MINISTÈRE DU COMMERCE, DE L'INDUSTRIE
ET DES COLONIES

EXPOSITION UNIVERSELLE INTERNATIONALE DE 1889
À PARIS

RAPPORTS DU JURY INTERNATIONAL

PUBLIÉS SOUS LA DIRECTION
DE

M. ALFRED PICARD
INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, PRÉSIDENT DE SECTION AU CONSEIL D'ÉTAT
RAPPORTEUR GÉNÉRAL

Groupe VI. — Machines et appareils de la Mécanique générale
(3e partie)

CLASSE 52

PARIS
IMPRIMERIE NATIONALE

M DCCC XCVI

RAPPORTS DU JURY

SUR

L'EXPOSITION UNIVERSELLE INTERNATIONALE DE 1889

5e
B1067

MINISTÈRE DU COMMERCE, DE L'INDUSTRIE
ET DES COLONIES

EXPOSITION UNIVERSELLE INTERNATIONALE DE 1889
À PARIS

RAPPORTS DU JURY INTERNATIONAL

PUBLIÉS SOUS LA DIRECTION
DE

M. ALFRED PICARD
INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, PRÉSIDENT DE SECTION AU CONSEIL D'ÉTAT
RAPPORTEUR GÉNÉRAL

Groupe VI. — Machines et appareils de la Mécanique générale
(3e partie)

CLASSE 52

PARIS
IMPRIMERIE NATIONALE

M DCCC XCVI

Fb 163
COMITÉ FRANÇAIS DES EXPOSITIONS À L'ÉTRANGER
N° 243
BIBLIOTHÈQUE

CLASSE 52

Machines et appareils de la mécanique générale

RAPPORT DU JURY INTERNATIONAL

PAR

M. HIRSCH

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
MEMBRE DE LA COMMISSION CENTRALE DES MACHINES À VAPEUR
MEMBRE DU JURY DES RÉCOMPENSES À L'EXPOSITION DE PARIS EN 1878

IMPRIMERIE NATIONALE.

Digitized by the Internet Archive
in 2018 with funding from
Getty Research Institute

https://archive.org/details/rapportsdujuryin63expo

COMPOSITION DU JURY.

MM. Phillips, *Président*, membre de l'Institut, inspecteur général des mines.. France.

Dwelshauwers-Dery, *Vice-Président*, ingénieur, professeur à l'Université de Liège, membre du jury des récompenses à l'Exposition de Paris en 1878..... Belgique.

Hirsch, *Rapporteur*, ingénieur en chef des ponts et chaussées, membre de la Commission des machines à vapeur, membre du jury des récompenses à l'Exposition de Paris en 1878..... France.

Bourdon, *Secrétaire*, ingénieur civil, constructeur mécanicien, médaille d'or à l'Exposition de Paris en 1878..... France.

Schaar (E.), inspecteur général au Ministère des chemins de fer, postes et télégraphes, membre du jury des récompenses à l'Exposition de Paris en 1878..... Belgique.

Thurston (R.-H.)..... États-Unis.

Richards (Ch.-B.)..... États-Unis.

Massey (W.-H.), ingénieur civil, électricien de Sa Majesté la Reine d'Angleterre..... Grande-Bretagne.

Anderson (W.), membre du Conseil d'administration de l'Institut des ingénieurs civils de Londres, vice-président de la Société des arts de Londres..... Grande-Bretagne.

Autenheimer, professeur..... Suisse.

Cornut (E.), ingénieur en chef de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du Nord, diplôme d'honneur à l'Exposition de Paris en 1878..... France.

Crozet-Fourneyron, député, ingénieur civil..... France.

Farcot, ingénieur civil, constructeur de machines, membre de la Commission centrale des machines à vapeur, grande médaille à l'Exposition de Paris en 1878..... France.

Haton de la Goupillière, inspecteur général des mines, directeur de l'École supérieure des mines, membre de la Commission centrale des machines à vapeur..... France.

Lavalley, ingénieur civil, sénateur..... France.

Michel-Lévy, ingénieur en chef au corps des mines, membre de la Commission centrale des machines à vapeur..... France.

Tissandier (Gaston), aéronaute..... France.

Weyher (Ch.), administrateur-directeur de la Société centrale de construction de machines, grande médaille à l'Exposition de Paris en 1878..... France.

Leauté, *suppléant*, ingénieur des manufactures de l'État, répétiteur à l'École polytechnique..... France.

Piat (A.), *suppléant*, fondeur mécanicien, grande médaille à l'Exposition de Paris en 1878..... France.

MACHINES ET APPAREILS
DE LA MÉCANIQUE GÉNÉRALE.

INTRODUCTION.

SOMMAIRE.

Caractère général du présent rapport. — Composition de la classe 52. — Progrès réalisés depuis 1878. — Précision scientifique des machines modernes. — Aspect extérieur. — Influence de la guerre et de la marine. — Des méthodes scientifiques appliquées aux arts mécaniques. — Progrès rapides de quelques industries. — Tables et sommaires.

Nous avons à rendre compte, dans le présent rapport, de la partie de l'Exposition universelle de 1889 comprenant les machines et appareils de la mécanique générale (classe 52 du catalogue), et à résumer les opérations du jury des récompenses en ce qui concerne cette classe.

Une première fois, lors de l'Exposition universelle de 1878, le jury de la mécanique générale nous avait fait l'honneur de nous désigner comme rapporteur. Le rapport [1] que nous avons eu à rédiger sur cette Exposition a été plus d'une fois consulté au cours des opérations du jury de 1889. Ce travail nous servira de point de départ pour l'examen que nous avons à faire de la mécanique générale en 1889; nous y apporterons le même esprit, la même méthode; nous avons conservé le même classement et le même ordre des matières; les comparaisons seront ainsi faciles à établir, et nous pourrons, sur plus d'un point, renvoyer à notre rapport antérieur. Ces deux rapports, celui de 1878 et celui de 1889, seront, pour ainsi dire, deux jalons plantés sur la route du progrès mécanique, et qui marqueront l'avancement entre les deux dates.

Le règlement général de l'Exposition de 1889 attribue à la classe 52 les *machines et appareils de la mécanique générale*. La classe 52 fait partie du groupe VI, qui comprend l'*outillage et les procédés des industries mécaniques et l'électricité*.

Le règlement établit comme il suit la nomenclature des objets dont se compose la classe 52 :

Pièces de mécanismes détachées : supports, galets, glissières, excentriques, bielles, parallélogrammes et joints, poulies, courroies, systèmes funiculaires, etc. Embrayages, déclics. Régulateurs et modérateurs de mouvement.

[1] Paris, Imprimerie nationale, 1883.

Appareils de graissage.

Compteurs et enregistreurs. Dynamomètres, manomètres, appareils de pesage, appareils de jaugeage des liquides et des gaz.

Machines servant à la manœuvre des fardeaux.

Machines hydrauliques : roues, turbines, machines à colonne d'eau.

Presses hydrauliques. Accumulateurs.

Machines motrices à vapeur, machines fixes, machines demi-fixes et machines locomobiles.

Chaudières, générateurs de vapeur et appareils accessoires.

Appareils de condensation des vapeurs.

Machines à vapeur autre que la vapeur d'eau; à vapeurs combinées.

Machines à gaz, à air chaud, à air comprimé.

Appareils pour la transmission de la force par l'eau et par l'air.

Moulins à vent et pananémones. — Aérostats.

A part quelques modifications de pure forme, cette classification est la même que celle qui avait été adoptée pour l'Exposition de 1878, sauf toutefois une différence importante : les moteurs électro-magnétiques étaient compris, en 1878, dans la mécanique générale; en 1889, ces moteurs ont été détachés et reportés à l'*électricité*, classe nouvelle, qui n'existait pas en 1878.

Aux objets portés à la liste ci-dessus, le jury a été conduit à ajouter un certain nombre d'autres objets, qui rentrent implicitement dans la même nomenclature; voici les principaux :

Pompes à vapeur, ascenseurs, indicateurs de pression et de vitesse, machines pour l'essai des métaux, dessins et ouvrages relatifs à la mécanique, sociétés ayant pour objet la sécurité dans les industries mécaniques, etc.

Enfin, aux termes de l'article 16 du règlement du jury international des récompenses, le jury de la classe 52 a eu à présenter des propositions pour les récompenses à attribuer aux *collaborateurs, contremaîtres* et *ouvriers*, ayant participé à la production d'objets remarquables figurant à l'Exposition.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, l'objet principal du présent rapport est de mesurer et de jalonner les progrès réalisés par les industries mécaniques dans les dix dernières années qui se sont écoulées.

Lors de la dernière Exposition, ce progrès ne s'est pas manifesté par des créations nouvelles, par quelqu'une de ces inventions éclatantes, qui modifient profondément les conditions économiques de la production : en 1889, nous retrouvons la plupart des machines qui figuraient à l'Exposition de 1878. Est-ce à dire pour cela qu'aucun progrès n'ait été accompli? Bien au contraire, les progrès sont considérables; mais ils sont pour ainsi dire intangibles, par ce fait même qu'ils sont très généraux. C'est ainsi que, suivant la comparaison pittoresque de notre illustre collègue M. Thurston, la crue imperceptible d'une vaste forêt se traduit d'année en année par un accroissement énorme des matériaux qui couvrent le sol.

Les progrès que nous avons à constater s'étendent, non seulement à la plupart des branches de la mécanique, mais encore et surtout aux méthodes générales appliquées dans les ateliers de mécanique. En 1878, on signalait deux facteurs qui prenaient chaque jour un rôle plus prépondérant dans la construction, à savoir : la précision des calculs et l'exactitude de l'exécution. Ces tendances se sont rapidement accentuées et développées.

En ce qui concerne les calculs préparatoires à la construction des machines, l'usage des procédés exacts et des méthodes rigoureuses s'est imposé d'une manière très générale. Les bureaux d'études sont dirigés par des ingénieurs d'une compétence consommée, ayant sous leurs ordres un personnel de dessinateurs et de calculateurs habiles, rompus aux difficultés des mathématiques et aux problèmes de la haute analyse; les programmes des machines à construire sont établis avec un soin particulier; il est tenu compte, non seulement des conditions générales, mais encore des circonstances particulières qui peuvent se présenter dans le service. Des programmes précis ainsi élaborés, sortent des projets exactement étudiés, ainsi que des données d'un problème de mathématiques en ressortent les solutions rigoureuses. Les dessins d'exécution sont cotés dans tous leurs détails : le dixième de millimètre est devenu l'unité courante, souvent subdivisée en fractions beaucoup plus petites.

Ces dessins sont livrés à l'atelier, et l'exécution, faite au moyen d'outils perfectionnés, vérifiés à l'aide de jauges et d'instruments spéciaux, atteint la précision même des cotes du dessin. On arrive enfin journellement à ce résultat que, dans une série de machines construites, une pièce quelconque de l'une des machines puisse être substituée à la pièce analogue d'une autre quelconque des machines de la série, immédiatement, sans autre ajustage, sans que les jeux et frottements soient altérés. L'interchangeabilité, propriété précieuse, n'est compatible qu'avec un ajustage de la plus haute précision.

Cette précision dans les formes réalisées se trouve, presque au même degré, dans les qualités des matériaux employés. Comme la mécanique, la métallurgie a développé la puissance et la rigueur de ses procédés; elle est en situation de fournir au constructeur des matières, aciers, bronzes ou alliages, possédant au degré voulu la résistance, la douceur, la dureté, la malléabilité et toutes les qualités réclamées, et cela dans des limites fort étendues. Le choix des matières à employer, la définition de leurs qualités, est une des préoccupations les plus sérieuses de nos ingénieurs, et les constructeurs possèdent des moyens de vérifier rigoureusement ces qualités.

Comme aspect extérieur, les machines se font chaque jour plus sobres et plus simples; en matière de mécanique, tout ce qui n'est pas utile est nuisible; aussi les ornements parasites ont-ils absolument disparu; les organes ont les formes qui conviennent au service à faire; les parties ajustées sont polies et brillantes, les parties brutes sont peintes de teintes sombres et uniformes. L'aspect général est sévère, mais

il est loin de manquer d'harmonie : l'appropriation rigoureuse des formes aux fonctions donne, comme effet plastique, un résultat des plus heureux. Il est vrai qu'on voyait encore, dans le palais, deux ou trois machines de modèle ancien, traitées en style gothique, dorique ou ionien, chargées de moulures et d'ornementations; ces vestiges d'un art suranné faisaient piètre figure auprès des simples et majestueux appareils, exposés par les grandes maisons de construction, et dont l'œil se plaisait à contempler les heureuses proportions et les lignes sobres et harmonieuses.

Ces changements importants survenus dans les pratiques de la mécanique sont dus à différentes causes : en dehors du progrès général, commun à toutes les industries, il convient de citer deux industries particulières, qui ont imprimé leur caractère à tout ce qu'elles ont touché; je veux parler de la guerre et de la marine. Dans notre vieille société européenne, laquelle est dominée par des convoitises malsaines, reliquat d'un long passé de rivalités et de luttes, depuis que le droit du plus fort a été cyniquement élevé au rang d'un principe, la puissance navale et militaire d'une nation est sa sauvegarde contre les ambitions de ses voisins. Malheur à qui se laisse devancer dans cette course effroyable au mieux armé! Toutes les forces sont tendues vers la solution des problèmes de la guerre; aux hommes comme à la matière inerte, on fait rendre tout ce qu'ils peuvent fournir, jusqu'à la limite de leur résistance. Sous la pression de ces exigences impitoyables, la mécanique des armes a dû aborder des problèmes qui ne s'étaient pas encore posés, ou qui étaient considérés comme insolubles; la métallurgie a fourni des produits possédant un ensemble de propriétés inconnues jusqu'alors; la construction a pris un caractère de précision parfaite, les machines ont atteint un degré extrême de légèreté et de puissance. Ces progrès ont eu leur retentissement même en dehors du cercle où ils avaient pris naissance, et les procédés rendus nécessaires par les exigences de la guerre se sont d'eux-mêmes étendus aux industries ordinaires.

La caractéristique de la mécanique moderne, c'est, avons-nous dit, la précision parfaite, tant dans la conception des machines que dans le choix et la mise en œuvre des matières qui entrent dans leur constitution. A cet égard, le chemin parcouru dans les dernières années est considérable. Le haut degré de précision atteint dans les constructions mécaniques modernes a été obtenu en grande partie grâce à l'usage de plus en plus répandu des instruments de contrôle exacts et des méthodes scientifiques appliquées aux machines. C'est la France qui est entrée la première dans cette voie féconde; c'est par des savants français qu'ont été créées les théories analytiques de la mécanique appliquée; citons au hasard, parmi tant de noms illustres, les Lagrange, les Carnot, les Coriolis, les Poncelet, les Clapeyron, les Bellanger, les Phillips, etc. Quant aux expérimentateurs, la liste n'en serait ni moins longue, ni moins brillante : Gay-Lussac, Regnault, Hirn, Morin, Tresca, etc. De chez nous, l'étude scientifique

des machines, de leur fonctionnement, de leurs organes, s'est répandue dans tous les pays, et les savants étrangers ont apporté à leur tour de riches contingents à la connaissance des phénomènes intéressant la mécanique. L'ardeur est vive, dans cette noble lutte, et chaque nation s'efforce de prendre la tête. En ce qui concerne l'analyse mathématique, on peut dire, sans trop de témérité, que la France tient encore sa place. Toutefois, il faut bien l'avouer, depuis quelques années notre pays s'est laissé devancer par d'autres sur le terrain de l'expérimentation scientifique des machines; quelque amère que puisse être cette constatation, il serait inutile et dangereux de la dissimuler. Mais le sujet est trop grave et trop délicat pour qu'il soit possible de le traiter en quelques mots; nous aurons l'occasion d'y revenir et d'y insister.

Si l'ensemble des matières attribuées à la mécanique générale en 1889 est à peu de chose près le même qu'en 1878, il existe cependant des différences notables dans les développements qu'ont pris quelques-uns de ces objets pendant les dix dernières années qui se sont écoulées. Je vais passer en revue quelques-unes de ces industries, qui ont pris subitement une extension exceptionnelle.

En 1878, les applications de l'électricité à la mécanique proprement dite étaient rares et peu importantes : l'Exposition contenait seulement quelques moteurs de très faible puissance, actionnés par des piles, et quelques timides essais de transmission de la force. En 1889, il en est tout autrement; l'électro-mécanique a pris subitement une importance industrielle de premier ordre; les machines, les appareils, les procédés se sont multipliés à tel point, ont fait l'objet d'applications si nombreuses, qu'il est devenu nécessaire de les grouper ensemble et d'en faire une classe spéciale, distincte de la mécanique générale.

Comme conséquence des développements rapides de l'industrie électrique, celle des moteurs à vapeur a fait des progrès importants. Il convient de noter, à cet égard, l'usage de plus en plus répandu des machines à allures rapides et des générateurs de petit volume.

Il est une autre industrie qui, dans les dernières années, a réalisé des progrès inattendus, c'est celle des moteurs à gaz. Ces progrès sont d'ailleurs, en grande partie, en corrélation avec l'extension subite des industries électriques.

La navigation aérienne était restée longtemps stationnaire : à part quelques données plus ou moins vagues sur les hautes régions de l'atmosphère, quelques ascensions hardies, exécutées dans un but scientifique, elle n'avait guère servi que de spectacle curieux et attrayant. Les services rendus au pays par les ballons, pendant la guerre de 1870, ont imprimé à l'aérostation un caractère tout nouveau et plus grave. L'étude des ballons en général, et en particulier celle des ballons captifs, a fait des progrès notables, auxquels le grand ballon de Giffard est venu, en 1878, donner une magnifique consécration. Depuis lors, les ascensions se sont multipliées, la confection et la conduite des aérostats se sont beaucoup perfectionnées; des études exactes et sérieuses

ont été faites, et enfin des expériences célèbres ont permis d'entrevoir le moment où la direction des ballons cessera d'être une utopie.

Il va de soi que, dans le présent rapport, nous insisterons davantage sur les industries qui ont réalisé, depuis la dernière Exposition, les progrès les plus importants. Les sommaires placés en tête des chapitres et la table qui termine ce volume indiquent d'ailleurs suffisamment l'ordre dans lequel les matières ont été traitées.

CHAPITRE PREMIER.

OPÉRATIONS DES COMITÉS ET DU JURY DES RÉCOMPENSES[1].

SOMMAIRE.

Objet et division.
Comité d'admission.
Comité d'installation. — Constitution, répartition des espaces, dépenses.
Jury des récompenses. — Constitution, mode d'opérer, jurisprudence, récompenses accordées. — Tableau comparatif des exposants récompensés aux Expositions universelles de 1867, 1878, 1889.

Tout se tient dans l'ensemble d'une Exposition; les opérations du jury des récompenses sont la suite et la conséquence des opérations des divers comités qui ont eu à préparer le travail, à faire un premier choix et une première élimination parmi les nombreuses demandes d'admission qui ont été présentées, à répartir les espaces, à assurer le gardiennage et les services. Il ne sera pas inutile de rappeler comment ont fonctionné le Comité d'admission et le Comité d'installation de la classe 52.

COMITÉ D'ADMISSION.

Le Comité d'admission de la classe 52 pour les exposants français a été constitué par arrêté ministériel en date du 11 mars 1887. Il était composé comme suit :

MM. Bougault (Alfred), ingénieur, sous-directeur de la Société anonyme des anciens établissements Cail.
Boulet (J.), ingénieur, vice-président de la Chambre syndicale des mécaniciens, chaudronniers et fondeurs de Paris.
Bourdon (Édouard), ingénieur civil, constructeur-mécanicien.
Bussière (Alfred), lieutenant-colonel attaché à la section technique du génie.
Camélinat, député de la Seine.
Chaligny, ingénieur civil, constructeur-mécanicien.
Collet (A.), ingénieur de la Société anonyme des générateurs inexplosibles (système A. Collet et Cie).
Couronne, inspecteur des machines des eaux de Paris.
Crozet-Fourneyron, député de la Loire.
Delaunay-Belleville (Louis), ingénieur-constructeur.
Domange (A.), fabricant de courroies.
Duval, directeur général de la Compagnie de Fives-Lille.
Farcot (Joseph), constructeur de machines à vapeur.
Feray (Léon), ingénieur civil, constructeur de moteurs hydrauliques.

[1] Une partie importante de ce chapitre a été écrite par M. *Édouard Bourdon*, secrétaire du Comité d'admission, du Comité d'installation et du jury des récompenses.

MM. Guimbert (F.), chef mécanicien de la ville de Paris, président du Syndicat général des mécaniciens, chauffeurs et conducteurs de machines de France et d'Algérie.

Hirsch (J.), ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur au Conservatoire national des arts et métiers et à l'École nationale des ponts et chaussées.

Imbert, député de la Loire.

Lavalley, ingénieur civil, sénateur du Calvados.

Léauté, ingénieur des manufactures de l'État, répétiteur à l'École polytechnique.

Lecouteux, ingénieur civil, constructeur mécanicien.

Le Gavrian, ingénieur-constructeur, député du Nord.

Liébaut (Arthur), de la Société centrale de construction de machines, ingénieur civil, président de la Chambre syndicale des mécaniciens, chaudronniers et fondeurs de Paris.

Marotel (C.), président du Syndicat français des chefs de service et contremaîtres des industries métallurgiques.

Michel-Lévy (A.), ingénieur en chef au corps des mines.

Piat (A.), fondeur-mécanicien.

Plichon (Édouard), fondeur en fer, vice-président de la Chambre syndicale des mécaniciens, chaudronniers et fondeurs de Paris.

Renard (Marie-Joseph-Paul-Théodore), capitaine à l'état-major particulier du génie, service de l'aérostation militaire.

Richard (Gustave), ingénieur civil, directeur de la Société des constructions mécaniques spéciales.

Souchet (J.-M.), secrétaire de la Chambre syndicale des chauffeurs-conducteurs-mécaniciens de la Seine.

Tissandier (Gaston), aéronaute et publiciste.

Une réunion plénière de tous les Comités d'admission eut lieu le vendredi 25 mars 1887, à 2 heures, à l'Hôtel de Ville, salle Saint-Jean, sous la présidence de M. Édouard Lockroy, Ministre du commerce et de l'industrie.

Le samedi 2 avril 1887, les membres du Comité d'admission de la classe 52 se sont réunis pour la première fois au pavillon Labourdonnais, afin de procéder à l'élection du bureau, qui a été constitué ainsi qu'il suit:

MM. Lavalley, *Président.*	MM. Hirsch, *Rapporteur.*
Liébaut, *Vice-Président.*	Bourdon, *Secrétaire.*

Le Comité dont il s'agit n'avait à s'occuper que des demandes présentées par les exposants français; les admissions des étrangers étaient réservées, dans chaque pays, à des commissions nationales.

Le travail du Comité d'admission soulevait un certain nombre de questions délicates. Elles ont été traitées dans la séance du 11 octobre 1888. Nous donnons ci-dessous quelques extraits du procès-verbal de cette séance:

M. le secrétaire communique au Comité un certain nombre de demandes d'admission, que l'Administration a renvoyées à l'examen du Comité de la classe 52, tandis que les exposants qui les ont faites se sont fait admettre dans d'autres classes.

M. Doumerc explique ce renvoi; il existe, dans les demandes en question, des éléments mécaniques qui ne peuvent évidemment ressortir qu'à la juridiction de la classe 52.

Divers membres font observer qu'il y a là une difficulté de principe, qui s'est présentée à mainte reprise dans les expositions précédentes; la classe de la mécanique générale, qui touche par tant de points à de nombreuses industries spéciales, a un intérêt tout particulier à ce que cette question soit enfin tranchée d'une manière équitable et satisfaisante.

La discussion est ouverte et des observations sont échangées sur cette question importante.

On fait remarquer en premier lieu que la difficulté d'attribution peut se présenter à propos de deux catégories d'appareils mécaniques :

1° Les appareils qui, dans leur ensemble, ressortissent à la fois à la mécanique générale et à une industrie spéciale, par exemple, les locomobiles agricoles, les pompes agricoles, les balances agricoles, les machines à vapeur de navigation, les locomotives, les pompes à incendie à vapeur, etc.;

2° Ceux qui se composent d'éléments différents, dont quelques-uns seulement sont du ressort de la mécanique générale, par exemple, les batteuses à vapeur, les moulins à eau ou à vapeur, les laboureuses à vapeur, les excavateurs et dragues, les dynamos, pompes, scieries et laminoirs à moteur direct, les outils en général actionnés par un moteur mécanique, etc.

Plusieurs membres montrent les graves inconvénients qui résultent de l'incertitude et de l'arbitraire de ces attributions. Certains industriels ne se font pas scrupule d'en abuser, pour obtenir des récompenses peu équitables. Ainsi, on présente dans l'agriculture des locomobiles et autres engins, qui n'ont rien de spécial à l'agriculture, dans l'espoir, trop souvent justifié, d'échapper à la comparaison avec les produits similaires présentés à la mécanique générale.

En conséquence de ces observations, le Comité émet l'avis suivant :

Tout appareil indivisible, dont la constitution est telle qu'il ne puisse être appliqué que pour une industrie déterminée, doit être attribué à la classe correspondant à cette industrie.

Tout appareil indivisible, dont la constitution est telle qu'il puisse être appliqué, non seulement à l'industrie pour laquelle il a été présenté, mais encore à d'autres industries, doit être attribué à la classe de la mécanique générale.

Lorsqu'un ensemble est composé d'appareils séparables, ceux de ces appareils qui sont constitués de telle sorte qu'ils puissent être appliqués à plusieurs industries doivent être attribués à la classe de la mécanique générale.

En ce qui concerne l'application de ces principes, elle peut être envisagée à trois points de vue différents :

1° Au point de vue de l'emplacement des appareils exposés;

2° Au point de vue de leur inscription au catalogue;

3° Au point de vue du jury des récompenses auquel les appareils doivent être attribués.

En ce qui concerne l'emplacement dans l'Exposition, les appareils mécaniques, dont l'application peut être faite indifféremment à diverses industries, doivent être exposés dans l'enceinte affectée à la mécanique générale, mais la classe 52 ne réclame ni les appareils dont l'application est plus spéciale à une industrie déterminée, ni les appareils faisant partie d'un ensemble qui ressortit à une industrie déterminée.

En ce qui concerne l'inscription au catalogue, tous les appareils ressortissant à la mécanique générale, en vertu des définitions ci-dessus données, qu'ils soient indivisibles ou qu'ils constituent une fraction d'un ensemble, doivent figurer au catalogue de la classe 52, avec renvoi aux catalogues des industries spéciales, pour ceux de ces appareils qui ne seront pas exposés dans les enceintes affectées à la classe 52.

En ce qui concerne les jurys des récompenses, tous les appareils inscrits au catalogue de la classe 52, conformément aux règles ci-dessus, devront être soumis au jury de ladite classe, sauf institution, dans les cas spéciaux, de jurys mixtes, délégués par les jurys des diverses classes compétentes.

Quant aux mesures à prendre dès à présent pour la mise en pratique de ces règles, le Comité émet le vœu, conforme d'ailleurs aux propositions présentées par le représentant de l'Administration :

Qu'il soit fait, par les soins de l'Administration, un dépouillement des demandes d'admission présentées au groupe VI, afin d'y retrouver et de renvoyer à la classe 52 les appareils qui, en vertu des principes ci-dessus rappelés, ressortissent à la mécanique générale.

Le Comité d'admission a tenu quinze séances, dont la dernière eut lieu le 30 avril 1889. Il a donc siégé deux années, au cours desquelles il a examiné 800 demandes d'admission.

Sur ces 800 demandes, 515 seulement ont été admises, les 285 autres ont été rejetées ou annulées pour différents motifs.

COMITÉ D'INSTALLATION.

Aux termes de l'arrêté ministériel du 12 décembre 1887, le Comité d'installation de la classe 52 devait être composé :

1° Des membres du bureau du Comité d'admission :

MM. Lavalley, *Président.*
Liébaut, *Vice-Président.*
MM. Hirsch, *Rapporteur.*
Bourdon, *Secrétaire.*

2° De quatre exposants, membres du Comité d'admission, et nommés par le Ministre :

MM. Boulet.
Delaunay-Belleville.
MM. Piat.
Richard.

3° De quatre membres pris parmi les exposants de la classe et élus par ces derniers.

Le Comité d'admission prit les dispositions nécessaires pour l'élection de ces quatre derniers membres, et le mercredi 30 mai 1888, les membres du bureau se sont réunis pour procéder au dépouillement des votes; les quatre exposants ayant obtenu les plus grands nombres de voix furent :

M. Joseph Farcot.
La Société des anciens établissements Cail, représentée par M. Bougault.
MM. Guyenet.
Gaston Tissandier.

Le Comité d'installation, se trouvant ainsi définitivement constitué, put commencer ses opérations. Dans la première séance, qui se tint le 12 juin 1888, le bureau se compléta par la nomination de M. A. Piat comme trésorier; la vingt-troisième et dernière séance eut lieu le 14 décembre 1889.

Conformément à sa mission, le Comité d'installation s'occupa :

1° De répartir, entre les exposants admis, les surfaces qui avaient été accordées à la classe 52 ;

2° D'assurer les recettes nécessaires pour couvrir les dépenses générales de la classe, telles que l'établissement des parquets, des balustres et des cordelières, la construction de l'annexe de la berge, le gardiennage, etc.;

3° De répartir les dépenses entre les exposants.

Voici les chiffres principaux concernant ces trois chapitres :

La surface occupée par la classe 52 dans la partie française s'élevait, en chiffres ronds, à 6,960 mètres, divisés comme suit :

Palais des Machines.	Machines motrices	760 mètres.
	Rez-de-chaussée	4,520
	Premier étage	630
Berge de la Seine		1,050

Si l'on défalque la surface des chemins d'accès, il reste une superficie réellement utilisée de 6,000 mètres carrés.

Les dépenses générales de la classe se sont élevées, en nombre rond, à 126,000 fr., correspondant à 21 francs par mètre de surface occupée; c'est la somme qui a été versée par les exposants. Ils avaient fourni une provision de 35 francs par mètre; la différence, soit 14 francs, leur a été remboursée.

La somme de 126,000 francs a été employée comme suit :

Ingénieurs et employés de bureau	20,000 francs.
Gardiens	12,000
Canalisations (eau, gaz, vapeur)	10,000
Plancher dans la galerie des Machines. Rez-de-chaussée et 1er étage	22,500
Balustres et torsades	7,000
Vitrines	6,500
Frais de bureau et divers	6,000
Construction des annexes sur la berge, avec installation d'une machine motrice et d'une transmission de mouvement	42,000
TOTAL	126,000

Il convient de faire remarquer que le Comité s'est trouvé, dès le début de ses travaux, en présence d'une double difficulté, résultant de ce que, dans la galerie des Machines, la direction de l'exploitation avait interdit le fonctionnement des appareils en feu, et ne pouvait fournir la quantité d'eau nécessaire pour les pompes et les appareils hydrauliques en mouvement. Le Comité demanda alors et obtint sur la berge de la Seine, rive gauche, en aval du pont d'Iéna, un emplacement de 1,050 mètres carrés pour l'installation de ces différents appareils; mais l'Administration refusa de participer aux frais nécessaires pour les abriter, parce qu'il n'y avait aucun crédit prévu pour cet objet. Le Comité se vit donc obligé de prendre à sa charge cette dépense, et il lui a paru équitable de la répartir entre tous les exposants français de la

classe. Sans cette circonstance particulière, les dépenses générales auraient été d'un tiers moins élevées ($42,000 = \frac{126,000}{3}$) et le prix du mètre de surface occupée ne serait revenu qu'à 14 francs.

La somme de 126,000 francs a été répartie entre 490 exposants français inscrits officiellement à la classe 52 et présents à l'Exposition.

JURY DES RÉCOMPENSES.

A la suite de la séance d'ouverture des opérations du jury, tenue le 12 juin, et dans laquelle M. le Directeur général de l'exploitation résuma les traits généraux du règlement du jury international, le jury de la classe 52 se réunit une première fois le 14 juin 1889. Dans cette première séance, il nomma son bureau.

Après quelques modifications, motivées par des démissions, le jury se trouva définitivement constitué de la manière suivante :

MM. Phillips, membre de l'Institut, inspecteur général des mines, *Président.*

Dwelshauwers-Dery, ingénieur, professeur à l'Université de Liège, *Vice-Président.*

Hirsch, ingénieur en chef des ponts et chaussées, membre de la Commission centrale des machines à vapeur, *Rapporteur.*

Bourdon, ingénieur civil, constructeur-mécanicien, *Secrétaire.*

Cornut (Ernest), ingénieur en chef de l'Association des propriétaires de machines à vapeur du Nord. (France.)

Crozet-Fourneyron, député, ingénieur civil. (France.)

Farcot, ingénieur civil, constructeur de machines, membre de la Commission centrale des machines à vapeur. (France.)

Haton de la Goupillière, inspecteur général des mines, directeur de l'École supérieure des mines, membre de la Commission centrale des machines à vapeur. (France.)

Lavalley, ingénieur civil, sénateur. (France.)

Michel-Lévy, ingénieur en chef au corps des mines. (France.)

Tissandier (Gaston), aéronaute. (France.)

Weyher (Charles), administrateur-directeur de la Société centrale de construction de machines. (France.)

Schaar (E.), inspecteur général au ministère des chemins de fer, postes et télégraphes. (Belgique.)

Thurston (R.-H.). [États-Unis.]

Richards (Charles-B.). [États-Unis.]

Massey (W.-H.), ingénieur civil, électricien de S. M. la Reine d'Angleterre. (Grande-Bretagne.)

Anderson (W.), membre du Conseil d'administration de l'Institut des ingénieurs civils de Londres, vice-président de la Société des arts de Londres. (Grande-Bretagne.)

Autenheimer, professeur. (Suisse.)

JURÉS SUPPLÉANTS.

MM. Léauté, ingénieur des manufactures de l'État, répétiteur à l'École polytechnique. (France.)

Piat (A.), fondeur-mécanicien. (France.)

Les objets à examiner étant extrêmement nombreux, et la durée des opérations étroitement limitée, on dut, pour abréger le travail, sans en amoindrir la maturité, appliquer la méthode déjà pratiquée en 1878 : on divisa les objets en trois catégories, et on confia l'examen détaillé de chacune des catégories à une section correspondante du jury; chacun des membres du jury s'attacha plus particulièrement à une section, d'après ses aptitudes et sa compétence. Les membres du bureau accompagnaient l'une ou l'autre des sections, ou visitaient isolément l'Exposition, suivant les nécessités de chaque jour. Cette division en sections n'avait d'ailleurs rien d'absolu, et l'on passait d'une section à l'autre, quand la nature des objets à examiner imposait ces mutations.

Après leurs visites, les sections faisaient des propositions, qui étaient soumises aux délibérations du jury; le vote définitif n'avait lieu qu'en assemblée plénière.

Sous les réserves qui viennent d'être indiquées, la répartition fut faite comme il suit :

Section A. — *Appareils à vapeur.* — Machines motrices à vapeur. — Machines fixes. — Machines demi-fixes et locomobiles. — Chaudières. — Générateurs de vapeur. — Foyers. — Fourneaux. — Cheminées et appareils accessoires. — Appareils de condensation des vapeurs. — Machines à vapeur autres que la vapeur d'eau; à vapeur combinées.

Cette section était composée comme il suit :

MM. Cornut, Farcot, Haton de la Goupillière, Michel Lévy, Thurston, Weyher.

Section B. — *Appareils hydrauliques, à gaz, à air.* — Machines hydrauliques élévatoires. — Norias. — Pompes. — Pompes à incendie. — Tympans. — Béliers hydrauliques, etc.

Récepteurs hydrauliques. — Roues-turbines. — Machines à colonne d'eau, etc. — Presses hydrauliques.

Machines à gaz, à air chaud, à air comprimé. — Appareils pour la transmission de la force par l'eau et par l'air. — Moulins à vent et pananémones.

Cette section était composée comme il suit :

MM. Anderson, Autenheimer, Lavalley, Richards, Crozet-Fourneyron.

Section C. — *Appareils et produits divers.* — Pièces de mécanismes détachées. — Arbres. — Supports. — Galets. — Glissières. — Excentriques. — Engrenages. — Bielles. — Parallélogrammes. — Joints articulés. — Poulies. — Courroies. — Systèmes funiculaires, etc.

Transmissions de mouvement par arbres, par câbles, par chaînes, etc. — Embrayages. — Déclics, etc. — Régulateurs et modérateurs de mouvement.

Appareils de graissage. — Appareils pour la préservation des accidents occasionnés par les machines. — Compteurs et enregistreurs. — Dynamomètres. — Manomètres. — Robinetterie. — Appareils de sûreté. — Appareils de pesage. — Appareils de jaugeage des liquides et des gaz. — Machines servant à la manœuvre des fardeaux. — Joints. — Tartrifuges. — Calorifuges. — Aéronautique. — Publications industrielles.

Cette section était composée comme il suit :

MM. Léauté, Massey, Piat, Schaar, Tissandier.

Cette répartition eut lieu dans la deuxième séance, tenue le 14 juin, dans l'après-midi.

IMPRIMERIE NATIONALE.

En raison de l'absence de quelques membres titulaires du jury, les jurés suppléants furent, dès le début, adjoints aux différentes sections et assistèrent aux séances générales.

Le 15 juin, le jury, toutes sections réunies, procédait à une reconnaissance générale de l'Exposition de la classe 52, et le 17 juin, à 9 heures du matin, le jury commençait ses visites officielles.

Du 14 juin, jour de la constitution de son bureau, au 10 août, jour de la clôture de ses opérations, le jury a tenu vingt-deux séances plénières.

En général, la matinée était consacrée aux visites dans l'Exposition, et l'après-midi aux séances plénières. Toutefois quelques après-midi ont été également employés en visites.

Les séances du jury ne laissaient pas que d'avoir un certain pittoresque. Elles étaient tenues dans une pièce basse et étroite d'un restaurant voisin de l'Exposition. On avait déjeuné en commun; la nappe enlevée, et sans quitter la table, on se mettait sans répit au travail, qui se prolongeait souvent jusqu'à 7 heures du soir et au delà. Les propositions des sections présentées, la discussion s'engageait, souvent vive et chaude, toujours courtoise, toujours impartiale et remplie d'idées élevées, d'aperçus ingénieux, de pointes spirituelles. La besogne devenait parfois accablante, dans cette atmosphère surchauffée; elle a été vaillamment menée jusqu'au bout, et ces séances si pleines, si intéressantes, où régnait la plus sincère et la plus parfaite cordialité, resteront comme un souvenir ineffaçable dans le cœur de tous ceux qui y ont pris part.

Bien des points délicats ont dû être examinés et ont donné lieu à de sérieux débats. En fin de compte, la jurisprudence qui avait été adoptée par le jury de la mécanique générale lors de l'Exposition de 1878 a été sanctionnée intégralement par le jury de 1889. Nous jugeons donc inutile d'y revenir.

Le jury, désireux d'ouvrir la voie des grandes récompenses à des exposants nouveaux venus et méritants, avait proposé des rappels de grands prix pour les maisons ayant obtenu des grands prix en 1878. Cette manière de voir n'a pas été acceptée : elle était, paraît-il, contraire au règlement, qui n'avait prévu aucun rappel des récompenses.

Les propositions de récompenses formulées par le jury de la classe 52 ont été soumises au jury du groupe VI, qui les a examinées à son tour, et a remonté d'un degré certains exposants ; c'était la preuve que le jury de la classe avait montré une grande modération dans ses demandes d'attribution de récompenses.

Les chiffres ci-après indiquent, par pays, le nombre des récompenses de chaque espèce qui ont été décernées aux exposants de la classe 52.

DÉSIGNATION DES RÉCOMPENSES.	FRANCE.	GRANDE-BRETAGNE.	BELGIQUE.	ÉTATS-UNIS.	SUISSE.	ITALIE.	ALSACE-LORRAINE.	COLONIES FRANÇAISES.	RUSSIE.	GRAND-DUCHÉ DE FINLANDE.	AUTRICHE-HONGRIE.	NORVÈGE.	PORTUGAL.	DANEMARK.	ESPAGNE.	PAYS-BAS.	PRINCIPAUTÉ DE MONACO.	ROUMANIE.	RÉPUBLIQUE ARGENTINE.	MEXIQUE.	BRÉSIL.	CHILI.	JAPON.	TOTAL.
EXPOSANTS.																								
Grands prix	8	2	2	1	3	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	16
Médailles d'or	52	5	5	7	2	//	2	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	73
Médailles d'argent	93	6	6	4	4	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	113
Médailles de bronze	89	10	9	12	3	//	//	//	//	1	//	//	2	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	126
Mentions honorables	96	10	9	2	1	3	//	1	2	//	1	1	1	1	1	//	1	//	//	3	//	//	1	134
Totaux pour les exposants	338	33	31	26	13	3	2	1	2	1	1	1	3	1	1	//	1	//	//	3	//	//	1	462
COLLABORATEURS.																								
Médailles d'or	10	//	//	//	1	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	11
Médailles d'argent	20	//	3	//	7	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	30
Médailles de bronze	15	//	5	//	1	//	2	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	23
Mentions honorables	10	//	1	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	11
Totaux pour les collaborateurs	55	//	9	//	9	//	2	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	//	75
Totaux généraux	393	33	40	26	22	3	4	1	2	1	1	1	3	1	1	//	1	//	//	3	//	//	1	537
Nombre d'exposants, y compris 29 exposants hors concours	490	39	35	30	15	3	3	2	2	1	1	1	4	3	1	1	1	1	5	7	1	1	1	648

On peut établir comme suit le tableau comparatif des exposants récompensés aux Expositions universelles de 1867, 1878, 1889.

DÉSIGNATION DES RÉCOMPENSES.	1867.	1878.	1889.
Grands prix (ou rappels)	2	12	16
Médailles d'or (ou rappels)	19	62	73
Médailles d'argent (ou rappels)	107	133	113
Médailles de bronze	130	184	126
Mentions honorables	128	178	134
Totaux des récompenses	386	569	462
Nombre des exposants	636	735	648

CHAPITRE II.

ENSEMBLE DE LA CLASSE 52.

SOMMAIRE.

Objet du chapitre.

Nombre d'exposants. — Par nature d'objets exposés. — Par nationalité.

Emplacements occupés. — Palais des Machines. — Annexe de la berge. — Expositions de la Grande-Bretagne, des États-Unis, de la Belgique, de la Suisse. — Pavillons spéciaux. — Emplacements affectés au service mécanique.

Service mécanique de l'Exposition. — Ses attributions. Fourniture de la vapeur. — Canalisations. — Machines motrices. — Transmission de la force motrice. — Ponts roulants. — Ascenseurs. — Éclairage électrique.

Plan général et légendes.

Données numériques sur le service mécanique de l'Exposition.

Avant d'entrer dans la description des objets exposés sous le titre de la *Mécanique générale,* nous allons examiner l'ensemble de l'exposition de la classe 52, au point de vue du nombre des exposants, de la nature des objets exposés, des emplacements occupés, de la puissance des générateurs et machines motrices, etc. Nous ferons, à cette occasion, une rapide étude du service mécanique de l'Exposition, lequel était chargé de distribuer la puissance motrice, l'eau et le gaz, et qui comportait un grand nombre d'organismes ressortissant à la mécanique générale.

La classe 52 se composait de 648 exposants ayant figuré réellement dans l'enceinte de l'Exposition; dans ce nombre ne sont compris, ni ceux qui, après avoir été admis, ont renoncé à exposer, ni ceux dont l'exposition n'était pas en état lors des visites du jury, ni les collaborateurs d'exposants. Ces 648 exposants peuvent être répartis en un certain nombre de catégories, suivant la nature des objets qu'ils présentaient; cette répartition est indiquée dans le tableau ci-après, comparativement à la répartition analogue faite pour l'Exposition de 1878. Dans ce tableau, on a porté chaque exposant dans la catégorie affectée à l'objet ou aux objets les plus importants de son exposition; toutefois certains exposants, ayant présenté des objets à peu près également intéressants et ressortissant à la fois à plusieurs catégories, ont dû être comptés deux ou plusieurs fois; il en résulte que le total du tableau ci-après est plus élevé que le nombre des exposants.

RÉPARTITION DES EXPOSANTS PAR CATEGORIES.

DÉSIGNATION DES OBJETS.		EXPOSITION DE 1889.		EXPOSITION DE 1878.	
		NOMBRE d'exposants.	TOTAUX partiels.	NOMBRE d'exposants.	TOTAUX partiels.
Générateurs de vapeur	Chaudières, foyers, fourneaux, etc.	79	175	66	152
	Accessoires de chaudières	96		86	
Machines à vapeur d'eau	Machines fixes, appareils de distribution, de condensation, etc.	86	148	128	255
	Locomobiles mi-fixes	42		82	
	Pompes à vapeur	12		23	
	Régulateurs	8		22	
Machines motrices diverses	Machines à air chaud, à gaz, etc.	32	32	17	32
	Moteurs électriques [1] à ressort, à poids, etc.	//		15	
Machines hydrauliques	Machines élévatoires	59	112	91	158
	Récepteurs	22		31	
	Accumulateurs, presses	5		8	
	Appareils hydrauliques divers	26		28	
Air comprimé ou en mouvement		34	34	24	24
Transmission du travail	Courroies, systèmes funiculaires	70	124	47	71
	Engrenages, embrayages	13		24	
	Appareils de graissage, joints, etc.	41		59	59
Machines servant à la manœuvre des fardeaux		38	38	52	52
Mesure du travail et de la force	Appareils de pesage	14	48	31	52
	Dynamomètres, compteurs, indicateurs	34		21	
Pièces de mécanismes détachées		18	18	12	12
Objets divers, sociétés, publications, etc.		43	43	106	106
TOTAUX		772	772	898	898
NOMBRE D'EXPOSANTS		648		810	

[1] En 1889, les moteurs électriques sont distraits de la classe 52 et renvoyés à la classe 53.

Les appareils à vapeur, machines et générateurs, conservent en 1889 la prépondérance numérique qu'ils présentaient en 1878. Toutefois les nombres portés au tableau ci-dessus sont loin de donner une idée exacte de l'importance relative des moteurs à vapeur qui figuraient aux deux Expositions. Les unités mécaniques, en 1889, étaient beaucoup plus puissantes; le palais des Machines, avec ses énormes machines en mouvement, la cour de la force motrice, avec ses puissantes et nombreuses batteries de chaudières, présentaient un spectacle qui frappait vivement tous les visiteurs.

On remarquera, dans le tableau ci-dessus, le nombre élevé des expositions relatives aux machines thermiques diverses; le développement pris par les machines à gaz a été l'un des caractères les plus tranchés de l'Exposition.

Le tableau ci-après donne le nombre d'exposants de chaque nationalité, en comparaison avec les nombres analogues relatifs aux Expositions universelles de 1878 et de 1867.

NOMS DES PAYS.	EXPOSITIONS de 1889.	de 1878 (1).	de 1867 (1).
France	490	436	296
Grande-Bretagne	39	98	96
Belgique	35	41	49
États-Unis	30	38	38
Suisse	15	13	6
Italie	3	15	33
Alsace-Lorraine	3	//	//
Allemagne	//	//	40
Colonies françaises	2	//	//
Russie	2	9	11
Grand-duché de Finlande	1	//	//
Autriche-Hongrie	1	26	24
Norvège et Suède	1	17	8
Portugal	4	1	2
Danemark	3	8	1
Espagne	1	7	12
Pays-Bas	1	8	5
A reporter	631	717	621

NOMS DES PAYS.	EXPOSITIONS de 1889.	de 1878 (1).	de 1867 (1).
Report	631	717	621
Principauté de Monaco	1	//	//
Roumanie	1	//	8
République Argentine	5	3	//
Mexique	7	//	//
Brésil	1	//	3
Chili	1	//	//
Japon	1	//	//
Grèce	//	2	1
Égypte	//	2	2
Chine	//	1	//
Canada	//	7	//
Victoria	//	1	//
Pérou	//	2	//
Républiques américaines	//	//	1
Bibliothèque technologique	//	75	//
TOTAUX	648	810	636

(1) La mécanique générale était attribuée, en 1878, à la classe 54 et, en 1867, aux classes 52 et 53.

Les exposants français sont plus nombreux en 1889 qu'aux expositions précédentes; par contre, le nombre des exposants étrangers a sensiblement fléchi; la cause en est à attribuer aux hésitations que certains Gouvernements ont mises à apporter leur concours; il ne faut pas oublier, d'autre part, que les industries électro-mécaniques ont été, en 1889, distraites de la mécanique générale, à laquelle elles étaient restées annexées dans toutes les Expositions précédentes.

Nous allons actuellement jeter un coup d'œil d'ensemble sur l'exposition de la mécanique générale; nous indiquerons les dispositions de la classe 52, les emplacements qu'elle occupait, les traits principaux qui distinguaient cette importante exposition.

Pour bien définir les emplacements attribués à la classe 52, il est nécessaire de rappeler, au moins dans ses lignes générales, le plan général de l'Exposition de 1889. Elle se divisait en trois grandes régions : le Champ de Mars, le Trocadéro et l'Esplanade des Invalides; ces trois régions étaient réunies entre elles par le pont d'Iéna et la galerie-annexe du quai d'Orsay.

Au Champ de Mars (voir fig. 1), où se trouvaient groupées les expositions industrielles les plus importantes, les bâtiments affectaient la forme d'un fer à cheval : au fond, du côté de l'École militaire, et occupant toute la largeur du Champ de Mars, s'élevait le palais des Machines; le long des deux faces latérales s'étendaient le palais des Beaux-Arts et celui des Arts libéraux; entre ces palais et celui des Machines étaient groupées en massif les expositions des Industries diverses. L'intérieur du fer à cheval était occupé par les parcs, les fontaines et bassins, l'exposition de la Ville de Paris, etc. A l'extérieur, dans l'espace compris entre les palais et l'enceinte de l'Exposition, s'élevaient des constructions variées, françaises et étrangères. A l'ouverture du fer à cheval se dressait la tour de 300 mètres, formant une entrée grandiose à ce magnifique ensemble, et entourée des pavillons des divers États. Enfin, le long de la Seine, de chaque côté du pont d'Iéna, la berge, transformée en quai, servait d'assiette à des expositions nombreuses.

En ce qui concerne la mécanique générale, les expositions de la classe 52 se trouvaient dispersées sur un grand nombre de points, répartis dans cette immense superficie. Cette dissémination résulte de la nature même des choses et du grand nombre de services auxquels la mécanique avait à subvenir. Pour faciliter la description, nous réunirons ces expositions en un certain nombre de groupes.

Un premier groupe d'exposants constituait un massif important; c'était, pour ainsi dire, le noyau de la classe; il était situé dans le palais des Machines, au pied de l'escalier d'honneur faisant face à la galerie de 30 mètres, et limité sur ses côtés par les grandes voies de l'Exposition. A l'angle le plus en vue, prenant façade sur le rond-point central du palais, se développait la magnifique machine de Farcot, d'une puissance de 1,000 chevaux, avec son majestueux volant en fonte et fer; non loin de là, on voyait l'admirable exposition de la Société de Pantin, avec le turbo-moteur de Parsons, puis les machines à gaz de 50 et 100 chevaux, les grues de montage de la tour Eiffel, l'exposition des maisons Belleville, Bourdon, celle des associations de propriétaires d'appareils à vapeur, etc. Enfin, au pied du grand escalier, à la place d'honneur, s'élevaient les vitrines sévères, dans lesquelles était résumée, sous forme de modèles élégants, l'histoire des grandes inventions mécaniques d'origine française. Toute cette partie de l'exposition était certainement une des plus attrayantes, aussi bien pour le simple curieux que pour l'homme d'étude.

Dans la galerie faisant l'étage du palais, vis-à-vis de l'emplacement occupé par la classe 52 au rez-de-chaussée, un espace avait été réservé à la même classe; entre autres objets dignes d'attention, on y remarquait la magnifique exposition de courroies de la maison Scellos, disposée avec goût sous forme de trophée.

Sur la berge de la Seine, entre le pont d'Iéna et le ponton des steamers du Louvre, s'élevait une halle coquette en briques, bois et vitrages, qui abritait les machines hydrauliques en mouvement, ainsi que diverses machines en feu. En aval de cette

halle, sur une sorte de promontoire largement ventilé, étaient installés les moulins à vent.

Palais des Machines, au rez-de-chaussée et à l'étage, berge de la Seine, ces trois groupes formaient le noyau de la classe 52. Suivant la formule adoptée, les exposants étrangers y étaient confondus avec les exposants français. Toutefois cette règle comportait de nombreuses exceptions.

En premier lieu, quatre des nations étrangères, qui avaient pris à l'Exposition une part considérable, avaient demandé et obtenu d'avoir, dans la galerie des Machines, des emplacements qui leur fussent spécialement réservés : c'étaient la Grande-Bretagne, la Belgique, les États-Unis et la Suisse. Chacun de ces États avait son propre territoire, sur lequel les produits de la mécanique générale étaient plus ou moins intercalés au milieu de ceux d'autres industries.

Quelques maisons importantes avaient obtenu, dans les jardins, des emplacements spéciaux; citons la maison Steinlen, les anciens établissements Cail, etc. Il y avait également les palais particuliers construits par quelques États, tels que la République Argentine, le Brésil, etc. Les appareils mécaniques s'y trouvaient mélangés à d'autres objets exposés. Il en était de même pour certaines machines installées, soit au Trocadéro, soit dans l'annexe du quai d'Orsay ou à l'Esplanade des Invalides.

Enfin, en vertu des dispositions du règlement, tous les appareils existant dans l'enceinte de l'Exposition devaient être considérés comme objets exposés. A ce point de vue, les appareils mécaniques affectés aux divers services de l'Exposition ressortissaient à la classe 52 ; et cette partie de son domaine était loin d'être la moins importante. Les machines motrices destinées à actionner les appareils en mouvement, les transmissions de travail, les pompes fournissant l'eau aux exposants, etc., tout cela rentrait dans les attributions de la mécanique générale; la classe 52 était l'intendant docile et empressé, qui distribuait la vie et l'activité dans les galeries de l'Exposition; et, pour remplir ces fonctions importantes, elle avait dû se multiplier et se disperser à l'infini.

La mise en mouvement de ces innombrables appareils avait été impartie à un service spécial créé pour cet objet, sous le nom de *Service mécanique de l'Exposition,* à la tête duquel se trouvait, comme directeur, M. Vigreux. Ce service comprenait les appareils classés dans la liste ci-après :

Générateurs de vapeur. — Canalisations. — Production de la force motrice. — Transmission de la force motrice. — Ponts roulants et ascenseurs. — Éclairage électrique.

Les générateurs destinés à fournir la vapeur aux machines motrices fonctionnant dans le palais des Machines étaient installés dans une série de bâtiments isolés, élevés dans la partie du Champ de Mars appelée la *Cour de la force motrice.* Cette cour

est un vaste rectangle de 30 mètres de large et 350 mètres de long, situé en arrière du palais des Machines, du côté de l'École militaire, et occupant toute la largeur du Champ de Mars. La fourniture de la vapeur est confiée à onze maisons, dont les noms figurent sur la légende du plan, fig. 1. Les marchés ont été passés pour une production normale d'environ 60,000 kilogrammes de vapeur à l'heure.

En outre, des usines nombreuses, installées, tant dans le parc et les cours que sur la berge de la Seine et dans les fondations de la tour de 300 mètres, comportaient de puissants générateurs, spécialement affectés au service de ces usines.

Les canalisations générales ont été construites pour satisfaire aux exigences de nombreux services : canalisations d'eau froide à haute et basse pression, d'eau chaude de condensation, de vapeur, de gaz, égouts et galeries. Nous n'avons pas à parler ici des canalisations d'électricité, non plus que des distributions spéciales d'air comprimé, ni des égouts généraux servant au drainage des palais et plates-formes.

La disposition adoptée a été celle de conduites suspendues dans des égouts accessibles pour la visite et l'entretien. Dans le palais des Machines, deux galeries souterraines ont été établies; elles sont parallèles aux grandes façades et courent, de part et d'autre du passage central, entre les supports des poutres portant les arbres de transmission. Ces galeries sont maçonnées, voûtées et pourvues de regards espacés de 4 m. 30. Les dimensions de ces galeries sont :

DÉSIGNATION DES GALERIES.	LONGUEUR.	LARGEUR.	HAUTEUR.
	mètres.	m.	m.
Galerie du côté de la cour de la force motrice.....	350	2 40	1 90
Galerie du côté des industries diverses.....	179	2 00	1 70

Ces galeries contiennent chacune trois conduites : une conduite de vapeur, une conduite d'eau froide, une conduite de condensation.

Ces galeries longitudinales sont recoupées par six galeries transversales, également munies de tuyaux; le service individuel de chaque appareil exposé est assuré par des conduites branchées sur la canalisation générale et installées dans de petits égouts ou des caniveaux.

La longueur totale des galeries maîtresses est d'environ 1,000 mètres. Les conduites principales ont 0 m. 40 et 0 m. 60 de diamètre.

La canalisation d'eau se divise en deux services : le service à haute pression et le service à basse pression.

Le service à haute pression, ou service haut, s'alimente directement aux conduites de la ville; il se divise lui-même en deux services : celui des eaux de rivière et celui des eaux de source. Les eaux de rivière sont prises au réservoir de Villejuif, alimenté en

eau de Seine par l'usine élévatoire d'Ivry; la charge motrice est d'environ 40 mètres; la conduite d'amenée a 0 m. 60 de diamètre; elle alimente les postes d'incendie, les gerbes et fontaines monumentales. Les eaux de source sont celles de la Vanne, amenées du réservoir de Montrouge, par une conduite de 0 m. 40, sous une charge d'environ 50 mètres; elles sont délivrées aux fontaines Wallace et aux nombreux restaurants et cafés disséminés dans les parcs.

Le service bas se divise également en deux services. Le service d'arrosage est desservi par l'usine municipale de Javel; il fournit l'arrosage des parcs inférieurs et le remplissage des lacs. L'eau pour l'alimentation des chaudières et la condensation est fournie par un service spécial à l'Exposition. A cet effet, deux usines élévatoires à vapeur ont été installées sur la berge de la Seine, l'une par MM. de Quillacq et Meunier, l'autre par M. Powell; elles prennent l'eau dans la Seine et la refoulent dans une bâche en tôle fonctionnant comme réservoir régulateur; la hauteur maxima de refoulement est de 22 mètres et le débit moyen prévu (notablement dépassé en service) est de 220 litres par seconde pour chaque usine; du réservoir régulateur, les eaux sont amenées aux chaudières et machines par une conduite de 0 m. 60.

La canalisation des eaux chaudes de condensation, de 0 m. 60 de diamètre, ramène à la Seine les eaux évacuées des condenseurs, ainsi que les eaux de vidange des chaudières.

Mentionnons simplement pour mémoire la canalisation de gaz, qui était établie au moyen de conduites branchées sur le réseau de la Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz.

La canalisation de vapeur, très étendue et très compliquée, a été construite par les concessionnaires de la fourniture de vapeur, en ce qui concerne les conduites maîtresses. Chaque exposant de machine à vapeur a eu à établir son branchement particulier.

Les machines motrices à vapeur actionnant la transmission générale installée dans le palais sont au nombre de 28; elles attaquent les poulies montées sur des beffrois qui divisent en travées les quatre arbres de transmission. En outre, quatre machines donnent le mouvement à des transmissions spéciales. La puissance totale utilisée est d'environ 2,600 chevaux, et les machines qui la produisent seraient en état de fournir une force motrice d'environ 5,300 chevaux.

Sans sortir de l'enceinte du palais, on y trouve plusieurs machines fonctionnant à vide, notamment la puissante machine de 1,000 chevaux exposée par la maison Farcot; d'autres sont consacrées au service de l'éclairage électrique. De nombreux moteurs à gaz sont en mouvement, actionnant des transmissions particulières, entre autres, les grandes machines de 50 et de 100 chevaux, exposées par la Compagnie française des moteurs à gaz.

En dehors du palais et dans les pavillons sont réparties les machines à vapeur qui donnent le mouvement aux divers services; le service électrique, entre autres, absorbe à lui seul environ 4,000 chevaux; cette puissance est produite par neuf stations prin-

cipales, établies dans les cours et parcs; en outre, treize postes d'électricité sont desservis, soit par des machines à vapeur, soit par des moteurs à gaz. L'annexe de la classe 52, installée sur la berge, comporte une transmission spéciale actionnée par une locomobile; d'autres transmissions sont mises en mouvement, soit par des moteurs à vapeur ou à air comprimé, soit par des courants empruntés à la canalisation d'électricité; de puissantes pompes à vapeur fonctionnent dans l'un des piliers de la tour Eiffel, pour comprimer l'eau utilisée par les ascenseurs et élever l'eau destinée aux divers services de la tour.

La puissance développée par les machines motrices était transmise, à l'aide de poulies et de courroies, à des arbres de couche, qui la distribuaient à leur tour aux divers appareils à mettre en mouvement. Sur la berge et dans les annexes, ces transmissions ne présentaient rien de particulier et nous n'en parlerons pas. Mais la transmission générale établie dans le palais des Machines offrait un véritable intérêt.

Quatre arbres de transmission parallèles couraient dans la longueur du palais. Ces arbres étaient placés à 4 m. 50 au-dessus du sol; ils tournaient dans des paliers suspendus à de fortes poutres en treillis. Ces poutres reposaient sur des supports en fonte, consistant en deux colonnes jumelées; les supports étaient espacés de 11 m. 20 d'axe en axe; au droit des machines motrices, ces supports étaient doublés, de manière à constituer de solides beffrois recevant l'attaque directe du moteur.

L'arbre de couche tournait à 150 tours; son diamètre était de 0 m. 090, renforcé au besoin au droit des beffrois; il était divisé en tronçons, correspondant aux sections commandées par chaque machine motrice; en cas d'arrêt d'une des machines, on pouvait accoupler, à l'aide de manchons, deux tronçons consécutifs. La longueur totale de la transmission principale du palais était de 1,360 mètres.

Nous avons vu que les chaises portant les arbres de transmission étaient suspendues à des poutres en treillis; ces poutres formaient quatre lignes parallèles, divisées en deux groupes de deux poutres, placés de part et d'autre de l'allée centrale du palais. Dans chaque groupe, les deux poutres, distantes de 18 mètres, portaient un pont roulant. A cet effet, les poutres avaient reçu, en section transversale, la forme d'un *A*; dans le bas étaient suspendues les chaises des arbres de transmission; sur le sommet de l'*A* courait un rail, servant de chemin de roulement aux galets du pont mobile. Pendant la période préparatoire, les deux ponts roulants servirent au levage et à la mise en place des machines et des appareils; pendant la durée de l'Exposition, ils furent aménagés pour le transport des visiteurs; le spectacle offert du haut de ces plates-formes mobiles, qui se transportaient d'un bout à l'autre de l'Exposition, était des plus intéressants et obtint le plus grand succès.

L'un des ponts roulants, celui qui circulait dans la travée voisine de l'École militaire, a été construit et exploité par MM. Mégy, Écheverria et Bazan; l'autre a été con-

LÉGENDE.

COUR DE LA FORCE MOTRICE.

1. Générateurs Babcock et Wilcox.
2. — Conrad Knap (système Boot).
3. — Daydé et Pillé.
4. — Roser.
5. — de Naeyer.
6. Exposition Heilmann, Ducommun et Steinlen.
7. Générateurs Belleville.
8. — de la Compagnie de Fives-Lille et de la Société de Pantin.
9. Installation électrique (avec chaudières, système Barbe), machines et dynamos, pour le service des ponts roulants du palais des Machines.
10. Générateurs Dulac et Fontaine.

Dans la cour, grues et appareils divers servant à la manœuvre des fardeaux.

PALAIS DES MACHINES.

11. Ascenseur Chrétien
12. Machine de Bérendorf.
13. — de Thomas Powell.
14. — de l'Horme.
15. — de la Société française de matériel agricole.
16. — du Creusot.

A. Emplacement réservé à la classe 52 (rez-de-chaussée et premier étage).

B. Vitrines des grandes inventions françaises.

17. Machine de Windsor.
18. — de Chaligny.
19. — de Boulet.

20-20. Ascenseurs pour le pont roulant de Mégy, Echeverria et Bazan.

21. Machine de la Société Cail.
22. — de Darblay.
23. — de Biétrix.
24. — de Pantin.
25. — de Leconteux et Garnier.
26. — de Brasseur.
27. — de la Compagnie de Fives-Lille.
28. — de Douane Jobin.
29. Ascenseur Édoux et accumulateur Morane jeune.

C. Exposition de la Grande-Bretagne.

30-30. Ascenseurs pour le pont roulant de Bon et Lustremant.

31-31. Machines de Davey, Paxman.

D. Exposition des États-Unis.

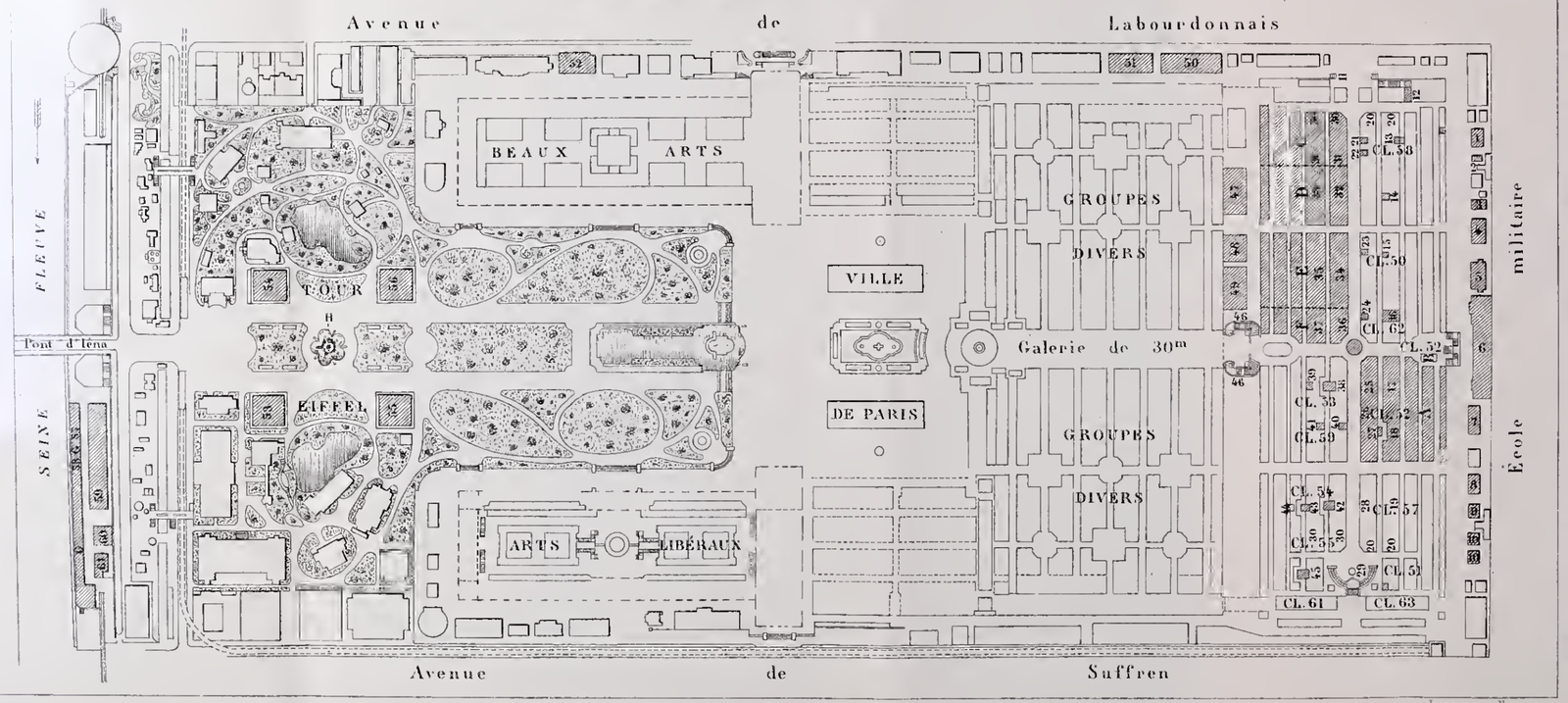
32. Machine Straight Line.
33. — Brown.

FIG. I.

PLAN GÉNÉRAL DE L'EXPOSITION.

▨ *Emplacements occupés par la Mécanique générale.*

Échelle de 0m,0003 p. m.



Imprimerie Nationale

LÉGENDE.

PALAIS DES MACHINES.

E. Exposition de la Belgique.

34. Machine du Phénix.
35. — de Carels.

F. Exposition de la Suisse.

36. Machine de la Société de Winterthur.
37. — de la Société d'Œrlikon.
38. — de Sulzer.
39. — d'Escher Wyss.
40. — de Berger André.
41. — d'Olry, Granddemange et Coulanghon.
42. — de la Société alsacienne.
43. — de Casse.
44. — de Buffaud et Robatel.
45. — de Quillacq.

46-46. Ascenseurs Samain.

COUR ENTRE LE PALAIS DES MACHINES ET LE PALAIS DES INDUSTRIES DIVERSES.

47. Station de la Société Gramme.
48. — du Syndicat des électriciens.
49. — de Leconteux et Garnier.

PARC, PARTIE LONGEANT L'AVENUE DE LABOURDONNAIS.

50. Anciens établissements Cail.
51. Fonderies et forges de l'Horme.
52. Station d'électricité Edison.

TOUR EIFFEL.

53-56. Ascenseurs Roux, Combaluzier et Lepape.

54-55. Ascenseur Otis.

H. Ascenseur Édoux (du deuxième au quatrième étage).

55. Usine d'eau comprimée.

BERGE DE LA SEINE.

GG. Annexe de la classe 52.

57. Machine Aubert.
58. Moteur à gaz Powell.
59. Station d'électricité.
60. Usine élévatoire de Quillacq et Meunier.
61. — Powell.

cédé à MM. Bon et Lustremant. Ces deux ponts étaient mus par l'électricité et avaient une force de 10,000 kilogrammes au crochet. Ils étaient desservis par des ascenseurs et des escaliers établis aux extrémités de leur parcours.

Outre les ascenseurs établis pour le service des ponts roulants, d'autres ascenseurs permettaient l'accès des divers points élevés du palais des Machines; en voici la liste :

Deux ascenseurs installés par M. Samain, de chaque côté de l'entrée de la galerie de 30 mètres et élevant les voyageurs du rez-de-chaussée à l'étage du palais;

Un grand ascenseur, établi par M. L. Édoux, au pied de l'escalier situé près de la façade de l'avenue Suffren; il conduisait les voyageurs à une plate-forme élevée de 23 mètres au-dessus du sol, et d'où l'on jouissait d'une magnifique vue sur l'ensemble de la galerie des Machines; il était desservi par un accumulateur et un appareil de compression d'eau construits par M. Morane jeune;

Un ascenseur installé par M. Chrétien dans l'un des pylônes métalliques qui flanquaient le portail d'entrée du palais, du côté de l'avenue de Labourdonnais; cet ascenseur était mis en mouvement par un courant électrique.

En dehors du palais, d'autres ascenseurs avaient été établis, desservant divers établissements et pavillons; nous rappellerons seulement les ascenseurs de la tour Eiffel, savoir :

Les deux ascenseurs du premier étage de la tour, système Roux, Combaluzier et Lepape;

Les deux ascenseurs du deuxième étage, construits par MM. Otis frères.

Enfin l'ascenseur allant du deuxième étage à la plate-forme supérieure de la tour, construit par M. L. Édoux.

Le plan (fig. 1) ci-joint indique, par un figuré spécial, les emplacements occupés par les diverses expositions se rattachant à la mécanique générale dans l'enceinte du Champ de Mars. Une pareille figuration, cela va de soi, ne saurait affecter le caractère d'une précision absolue dans toutes ses parties, attendu que, sur plus d'un point, les appareils mécaniques se trouvaient mélangés à des objets exposés par d'autres industries : il suffira de citer, comme exemples, les expositions de la maison Heilmann, Ducommun et Steinlen, de la Société des anciens établissements Cail, des Fonderies et forges de l'Horme, les différentes stations d'électricité, et enfin la tour de 300 mètres, laquelle ne ressortit à la classe 52 que par ses ascenseurs et l'usine de compression d'eau établie dans l'un de ses piliers. En ce qui concerne en particulier le palais des Machines, dans les expositions nationales de l'Angleterre, des États-Unis, de la Suisse et de la Belgique, les appareils de la mécanique générale étaient tellement mélangés à ceux ressortissant aux autres industries mécaniques, que la distinction sur le plan eût été impossible, et qu'on a dû étendre les hachures à la superficie totale de ces expositions. Dans le plan ainsi que dans la légende qui y est jointe, on a indiqué les principaux

COMITÉ FRANÇAIS DES EXPOSITIONS À L'ÉTRANGER
N° 243
BIBLIOTHÈQUE

appareils placés sous la surveillance du service mécanique, générateurs, machines motrices, ascenseurs, etc. Mais on n'a pu y faire figurer ni les canalisations, ni les transmissions, ni les ponts roulants.

Les superficies occupées par ces divers emplacements se répartissent comme il suit (chiffres ronds) :

		mèt. carrés.	mèt. carrés.
Palais des Machines, groupe central	au rez-de-chaussée.....	4,520	5,150
	au premier étage.....	630	
Palais des Machines, machines motrices.....			760
Berge de la Seine.....			1,050
Pavillons séparés et nations étrangères.....			4,490
			11,450

Nous terminerons par quelques données numériques sur le service mécanique de l'Exposition, comparé aux données analogues relevées dans les expositions antérieures.

DÉSIGNATION.	UNITÉS.	EXPOSITIONS DE 1889 [1].	DE 1878.	DE 1867.
GÉNÉRATEURS DE VAPEUR.				
Batteries de chaudières.....	Nombre.	7	16	//
Corps de chaudières.....	*Idem.*	30	19	32
Fournisseurs.....	*Idem.*	11	//	//
Production de vapeur pendant la durée de l'Exposition.....	Kilogr.	68,797,000	39,473,000	//
Production moyenne par jour de marche.....	*Idem.*	382,205	219,450	//
MACHINES MOTRICES DE LA TRANSMISSION GÉNÉRALE.				
Machines.....	Nombre.	32 [2]	41	52
Puissance totale en allure moyenne.....	Chevaux.	5,320 [3]	2,533	854
Puissance moyenne par machine.....	*Idem.*	166	62	16,05
TRANSMISSION GÉNÉRALE.				
Fournisseurs.....	Nombre.	11	24	//
Longueur cumulée des arbres.....	Mètres.	1,360	2,176	792
Puissance moyenne transmise par mètre courant...	Chevaux.	2.23	1.16	1.08

[1] On ne comprend, dans la nomenclature de 1889, que les appareils placés sous la dépendance du service mécanique et non pas les générateurs des diverses usines mécaniques et électriques installées dans des pavillons spéciaux.

[2] Les machines à deux, trois ou quatre cylindres sont comptées pour une seule unité.

[3] Puissance que les machines seraient en état de fournir en marchant à leur allure moyenne; le travail réellement absorbé dans le service n'a pas dépassé la moitié de ce chiffre.

CHAPITRE III.

GÉNÉRATEURS DE VAPEUR.

SECTION I.

GÉNÉRALITÉS.

SOMMAIRE.

Objet et division.

Théorie de la production de la vapeur. — Transmission de la chaleur. — Intensité de la vaporisation au coup de feu. — Température de la tôle. — Influence des mouvements de l'eau et des gaz chauds. — Pertes par radiation et conduction. — Réchauffeurs d'eau d'alimentation. — Rôle du réservoir d'eau dans les explosions.

Chaudières à petits éléments. — Leur application dans les stations d'électricité. — Règlements et dérogations.

Pressions en usage. — Détente par cascade.

Vapeur surchauffée.

Accidents de chaudières. — Maladies des chaudières. Statistique des explosions. — Explosions des chaudières à petits éléments. — Associations de propriétaires d'appareils à vapeur.

Du fer et de l'acier. — Leur emploi dans la construction des chaudières. — Chaudières en acier de Meunier et Cie, de Fontaine et Cie, de Galloway et fils.

Rivures.

Soudure et forgeage. — Chaudières soudées d'Imbert frères, de Davey Paxmann et Cie, de Galloway et fils. — Exposition de la Leeds Forge Cie.

Le présent chapitre a pour objet l'étude de la production de la vapeur.

Les appareils employés dans l'industrie pour faire la vapeur sont les foyers, les chaudières et les organes accessoires. L'examen de ces appareils fera l'objet des sections suivantes. Dans la 1re section de ce chapitre, nous étudierons seulement les questions générales, à savoir : l'état actuel de la science des chaudières et de leur construction.

La théorie de la production de la vapeur n'a pas fait, depuis 1878, des progrès bien notables; d'ailleurs, la plupart des problèmes importants relatifs à la production de la vapeur avaient été, dès cette époque, à peu près élucidés; néanmoins il subsiste encore bien des points obscurs, et l'on ne voit pas qu'à cet égard nos connaissances se soient beaucoup étendues, depuis les expériences célèbres exécutées jadis sous les auspices de la Société industrielle de Mulhouse. Cependant il est bon de constater un fait, qui est loin d'être sans importance : les notions exactes, relatives aux phénomènes qui président à la production de la vapeur, sont beaucoup plus répandues aujourd'hui qu'il y a dix ans. En ce qui concerne les dispositions des générateurs, elles sont, en général, bien

étudiées et sagement établies, et ne présentent plus guère de ces contresens qu'on rencontrait encore il n'y a pas bien longtemps. Quant à la conduite des générateurs, il y a un progrès marqué dans l'instruction professionnelle des chauffeurs; nombre d'entre eux connaissent leur métier et savent se rendre compte de ce qu'ils font. Cette amélioration, très réelle, est due en grande partie à l'influence des associations de propriétaires d'appareils à vapeur et à celle des cours professionnels, soit indépendants, soit établis sous les auspices de ces sociétés. Malheureusement, à ce point de vue, il reste encore beaucoup à faire, et ils ne sont pas rares les industriels qui traitent encore la chose avec dédain, et prennent pour chauffeurs de simples manœuvres ignorants, au grand préjudice de leurs propres intérêts et, souvent même, de leur sécurité.

Au point de vue du rendement économique des générateurs de vapeur, la question du foyer, de ses dispositions, de ses proportions, de sa conduite est des plus importantes. Nous aurons l'occasion de l'étudier en détail dans la 4e section du présent chapitre. Pour le moment, laissant de côté la production de la chaleur, nous allons suivre cette chaleur dans son trajet jusqu'à l'eau de la chaudière. Comment se fait cette transmission? Dans quelles conditions est-elle modifiée? Ce sont là des points du plus haut intérêt, puisque, en définitive, la vapeur produite est, toutes choses égales, en proportion rigoureuse de la chaleur transmise du foyer à l'eau de la chaudière.

Cette transmission comporte, dans tous les cas, trois phases : passage de la chaleur du foyer au métal, passage dans la masse du métal, et enfin passage à travers la face intérieure de la paroi. On sait qu'en thèse générale le premier passage est incomparablement plus difficile que les deux derniers; autrement dit, quand la tôle est bien saine et bien mouillée par l'eau, la température du métal, dans toute son épaisseur, diffère peu de celle de l'eau qui le baigne; mais cette température est au contraire bien inférieure à celle qui règne dans le foyer ou dans les carneaux. Ces notions sont, depuis assez longtemps, bien établies; mais elles manquent de précision; on ne possède pas de chiffres certains, caractérisant ce que l'on appelle, d'une part, la *conductibilité intérieure* du métal, c'est-à-dire la propriété qu'il possède de laisser la chaleur se propager dans sa masse, d'autre part la *conductibilité extérieure,* c'est-à-dire la propriété d'échanger la chaleur avec des fluides, liquides ou gaz, qui baignent les faces de la lame métallique.

La température de la masse gazeuse qui s'élance du foyer va constamment en s'abaissant, au fur et à mesure que le courant cède de la chaleur aux parois de la chaudière, et l'intensité de la transmission de la chaleur va en diminuant en proportion. La partie de la surface de chauffe qui avoisine la grille est donc beaucoup plus active, comme production de vapeur, que les parties qui suivent: près du débouché des carneaux, au rampant, le mètre carré de surface de chauffe ne produit qu'une quantité de vapeur relativement insignifiante.

Si l'allure générale de la vaporisation est assez bien connue dans son ensemble, ici encore on manque de données numériques exactes et, sur ce point, on n'est guère plus avancé aujourd'hui qu'en 1878. Tout au plus peut-on citer quelques expériences récentes, qui ont eu pour objet la mesure de la vaporisation au coup de feu et qui ont montré que, même avec une combustion fort active, cette vaporisation est loin d'atteindre les chiffres considérables que certaines théories avaient indiqués; il semble résulter de ces expériences que, dans les chaudières fixes, la vaporisation au coup de feu est généralement comprise entre 100 et 200 kilogrammes d'eau froide vaporisée par heure et par mètre carré de surface de chauffe, le premier chiffre correspondant à un feu bas et le second à un feu très violent.

Au point de vue de la théorie de la transmission de la chaleur, aussi bien qu'au point de vue plus pratique de la conservation et de la durée des chaudières, il serait intéressant de savoir quelles températures peut atteindre la tôle dans les points où elle est le plus exposée, c'est-à-dire au coup de feu. A cet égard on possède quelques données récentes et assez précises. Lorsque la tôle est bien saine et bien mouillée par l'eau de la chaudière, la température de sa face extérieure, en contact avec les flammes au coup de feu, est supérieure de 50 à 100 degrés à celle de l'eau renfermée dans la chaudière, suivant l'activité de la combustion et le voisinage du charbon incandescent.

Mais la question change complètement d'aspect, on le sait depuis fort longtemps, soit lorsque le métal est discontinu, par suite de la présence de pailles dans le corps de la tôle ou de doubles épaisseurs aux rivures, soit lorsqu'il est mal mouillé à l'intérieur. En pareil cas, la température peut s'élever considérablement, et des accidents graves sont imminents. Sur ce point encore des expériences récentes ont donné quelques indications. Ainsi la doublure des tôles n'est réellement dangereuse que lorsque les deux lames ne sont pas en contact immédiat; mais une couche d'oxyde interposée, même lorsqu'elle est très mince, suffit pour modifier du tout au tout les conditions de la transmission, et exposer la lame extérieure à être facilement brûlée.

Depuis longtemps, on savait que les corps gras mélangés à l'eau de la chaudière pouvaient, dans certaines conditions, amener des accidents; mais ces conditions n'étaient pas définies. On a constaté récemment qu'à ce point de vue, les corps gras organiques sont beaucoup plus dangereux que les huiles minérales : une simple tache d'huile de lin suffit, sous une combustion qui n'a pas besoin d'être très active, pour produire sur la tôle un rougissement local, lequel s'étend ensuite progressivement, et peut gagner en peu de temps une large surface.

Par suite de la facile transmission de la chaleur, dans les cas ordinaires, entre le métal et l'eau, la vaporisation n'est pas sensiblement influencée par les mouvements que peut prendre le liquide à l'intérieur de la chaudière. Il en est tout autrement en

IMPRIMERIE NATIONALE.

ce qui concerne les mouvements des gaz chauds de la combustion; ils facilitent dans une large mesure l'entrée de la chaleur par la face extérieure du métal; une surface baignée par des gaz stagnants donnera beaucoup moins de vapeur au mètre carré que si le courant de gaz chauds est animé d'une grande vitesse; c'est ce qui explique la puissance de vaporisation de la surface de chauffe dans les locomotives. Toutefois ces notions, aujourd'hui bien établies, auraient besoin d'être précisées par des expériences exactes.

Parmi les conséquences remarquables auxquelles ont été conduits les expérimentateurs de Mulhouse, il en est deux qui méritent une grande attention. En premier lieu, on a constaté, dans les générateurs soumis aux expériences, que les pertes de chaleur par rayonnement et conductibilité atteignaient une proportion importante, près du quart de la quantité de chaleur représentée par le combustible consommé. En second lieu, au point de vue de la production économique de la vapeur, les divers systèmes de générateurs essayés, quoique très différents dans leurs formes et leurs dispositions, se sont montrés à peu près équivalents entre eux, les différentes causes de pertes de chaleur se balançant sensiblement les unes les autres.

Mais ces expériences sont déjà anciennes; elles ont porté sur des chaudières de grandes dimensions et marchant à allure lente. Il semble qu'aujourd'hui on soit en droit d'atténuer ce que ces deux énoncés peuvent avoir de trop absolu, que les pertes par rayonnement n'atteignent pas toujours la proportion considérable constatée à Mulhouse, et que certains types de chaudières présentent quelque supériorité économique par le fait même de leurs dispositions.

Les deux questions sont corrélatives l'une de l'autre; eu égard à l'importance des déperditions extérieures, les systèmes de chaudières à faible volume et à vaporisation active sont évidemment dans de bonnes conditions de rendement, pour peu que les autres causes de pertes ne soient pas exagérées outre mesure. Or, dans ces dernières années, par suite de circonstances sur lesquelles nous aurons plus d'une fois à revenir, les chaudières à faible volume ont pris une grande extension; établies en général par de bons constructeurs, étudiées avec soin dans leurs dispositions et dans leurs détails, conduites nécessairement, par suite de leur délicatesse, par des chauffeurs expérimentés et consciencieux, elles donnent souvent des résultats économiques un peu supérieurs à ceux fournis par les anciennes chaudières à grand volume.

Comme conséquence, et sans sacrifier le bon emploi du combustible, on a pu, dans ces chaudières, réaliser un progrès qui n'est pas sans importance : c'est de restreindre la surface de chauffe, ou autrement dit, de demander à chaque unité de cette surface une vaporisation plus active. Avec les anciennes chaudières, lorsqu'on voulait obtenir une grande économie dans la dépense de charbon, on s'imposait comme règle de ne pas dépasser une vaporisation de 10 à 12 kilogrammes par heure et par mètre carré de surface de chauffe. Avec les chaudières modernes à disposition compacte, on peut

augmenter ces chiffres de 40 à 50 p. 100, sans que le rendement utile du charbon en soit diminué.

Les réchauffeurs d'eau d'alimentation étaient adoptés, dans les anciennes installations, lorsque l'économie extrême du combustible était une condition imposée. Ces appareils, à côté de leurs avantages, présentent des inconvénients pratiques qui en ont beaucoup restreint les emplois : nécessité de leur donner une grande surface de chauffe, de les nettoyer constamment, corrosions rapides, entretien difficile et coûteux. Ces appareils dispendieux, qui ont joui pendant assez longtemps d'une certaine faveur, sont moins en usage aujourd'hui, surtout avec les chaudières à petit volume.

Les générateurs à petit volume possèdent encore d'autres propriétés, qui constituent, dans beaucoup de cas, la raison même de leur emploi, et sur lesquelles il est nécessaire d'insister.

Lorsqu'un générateur vient à faire explosion, les débris de l'appareil rompu sont lancés comme des projectiles à des distances souvent fort grandes, et occasionnent de graves dégâts. La puissance mécanique qui est l'origine de ces projections réside dans l'eau chaude contenue dans la chaudière; au moment de la rupture, cette eau émet de la vapeur, qui agit sur les fragments de la paroi de la même manière que, dans une pièce de canon, les gaz de la poudre agissent sur le boulet; c'est cette eau chaude qui constitue la matière explosive; les ravages causés par l'explosion sont, toutes choses égales, d'autant plus étendus que la quantité d'eau présente dans le générateur était plus grande et que cette eau était plus chaude. L'administration supérieure, protectrice de la sécurité publique, a édicté des dispositions réglementant l'installation des générateurs, en vue de protéger le voisinage contre les conséquences possibles d'une rupture. Ces dispositions sont d'autant plus rigoureuses, que le volume de la chaudière est plus grand et que la température en service est plus élevée. C'est en grande partie en vue d'échapper à ces sujétions qu'ont été créés les types de chaudières dits *à petits éléments,* dans lesquels le volume d'eau est extrêmement restreint.

Un fait récent s'est produit, qui a donné à ce genre de chaudières une rapide extension dans la pratique. Il s'agit de l'éclairage électrique.

A la suite de l'Exposition de 1881, l'éclairage électrique prit un essor considérable, et on installa en peu de temps un grand nombre d'usines pour la production de l'électricité. Dans de pareilles installations, les conditions sont telles, que l'usine productrice de l'électricité doit être établie le plus souvent au centre même des lieux à éclairer, c'est-à-dire au milieu de locaux qui sont en général très fréquentés. La présence de générateurs puissants dans les sous-sols d'édifices publics, de théâtres, de grands magasins, parcourus par une foule pressée, est une cause de graves appréhensions; en cas de rupture de pareilles chaudières, la projection des débris au milieu d'un public nombreux et impressionnable pourrait amener les plus effrayantes catastrophes. Les précautions

de prudence, que la considération du péril public obligerait par elle-même à prendre, sont d'ailleurs imposées par les règlements administratifs. En de telles circonstances, il est clair que les chaudières à grand volume doivent être absolument écartées. La solution du problème se trouve dans les chaudières ne contenant qu'un très faible volume d'eau, et c'est cette solution qui a été universellement adoptée. C'est ainsi que les générateurs à petits éléments se sont rapidement multipliés dans ces dernières années, et qu'un grand nombre de maisons se sont mises à étudier et à construire ces appareils.

Cette subite expansion d'un système de générateurs, qui avait été peu pratiqué jusqu'alors, a conduit à examiner de nouveau les conditions de sécurité qu'il convenait de leur imposer. La puissance à développer pour éclairer par l'électricité est, dans beaucoup de cas, très considérable; c'est par centaines et milliers de chevaux qu'elle se compte. Or, si faible, relativement parlant, que soit le volume des nouveaux générateurs, il n'en faut pas moins, lorsqu'il s'agit de produire des travaux mécaniques de cette importance, compter un volume considérable pour l'ensemble des batteries de chaudières. Les règlements en vigueur n'avaient pas prévu de pareils cas; leur application rigoureuse eût absolument entravé le développement de l'industrie nouvelle.

Profitant de la latitude qui lui était laissée par ces règlements eux-mêmes, et sans se départir des règles de stricte prudence imposées par la nature des choses, l'Administration procéda, dans chaque espèce, par voie de dérogations individuelles, accordées à la suite d'enquêtes soigneusement conduites; il en résulta une série d'études du plus haut intérêt sur les conditions de sécurité à imposer à ces nouveaux générateurs; en un temps relativement court, la jurisprudence a pu s'établir; les modifications qu'il faudra, sans nul doute, apporter aux règlements actuels se trouvent d'ores et déjà établies sur des bases certaines et avec toute la maturité désirable. Nous n'avons pas à entrer dans le détail des dispositifs reconnus nécessaires pour garantir la sécurité publique; toutefois nous devons constater que, jusqu'ici, le but poursuivi a été complètement atteint, et que, s'il est malheureusement arrivé des accidents sérieux dans les chaufferies des chaudières à petits éléments, du moins aucun de ces accidents n'a été accompagné de projections violentes, mettant en danger le public en dehors de l'enceinte même de l'usine.

Les pressions en usage dans les machines à vapeur n'ont cessé d'aller en augmentant. Au point de vue théorique, il est clair qu'il y a tout intérêt à se servir de pressions élevées : meilleure utilisation de la chaleur développée par le combustible, machines plus légères et moins encombrantes; ce dernier avantage est souvent d'une importance capitale lorsque, par exemple, on doit installer l'usine productrice de force motrice dans les locaux étroits et resserrés : c'est le cas des machines marines et de la plupart des installations électriques.

Les hautes pressions n'augmentent pas les chances d'accident; il suffit que les

récipients qui renferment la vapeur soient d'une construction assez robuste et entretenus en bon état. Ce n'est donc pas par la question de sécurité qu'on est limité dans l'emploi des pressions élevées. Les principales difficultés sont l'étanchéité des joints et le graissage des surfaces frottantes. Ce n'est qu'à la suite de patientes recherches et de longs tâtonnements que ces difficultés ont pu être surmontées; et, au fur et à mesure, on a vu s'élever les pressions pratiquées dans l'industrie.

Au commencement du siècle, toutes les machines à vapeur travaillaient à basse pression, c'est-à-dire à une pression dépassant à peine celle de l'atmosphère. La création des machines sans condensation, et notamment des locomotives, obligea à recourir à des pressions plus élevées; mais le chiffre de 4 à 5 kilogrammes effectifs ne fut guère dépassé jusque vers le milieu du siècle; et même, pour les appareils marins, on en resta longtemps encore aux pressions de 1 à 1 kilogr. 5 effectifs, par suite des difficultés d'entretien résultant de l'emploi des eaux salées de la mer pour l'alimentation des générateurs. En 1878, on était arrivé à peu près aux chiffres suivants :

	Kilogrammes effectifs.
Pour les appareils fixes de l'industrie, pressions de	5 à 6
Pour les locomobiles	6 à 8
Pour les locomotives	8 à 10
Pour les machines marines, munies de condenseurs par surface	3 à 5

Ces pressions sont notablement dépassées aujourd'hui; sans doute, dans les grandes installations fixes, comportant un développement considérable de conduites de vapeur, on juge encore prudent de s'en tenir à des pressions d'environ 6 kilogrammes, de crainte de multiplier les fuites et de rendre l'entretien coûteux; mais on n'hésite pas à adopter des pressions plus élevées, pour peu que les circonstances l'exigent. Ainsi, dans les usines électriques, on trouve couramment des générateurs à petits éléments timbrés à 10, 12 et même à 15 kilogrammes; les pressions de 6 à 10 kilogrammes sont d'un usage ordinaire dans les grands navires et pour les torpilleurs; le timbre des locomotives modernes ne descend guère au-dessous de 10 kilogrammes; il s'élève souvent à 12 kilogrammes et parfois même à 15 kilogrammes.

En même temps que l'usage des pressions élevées, s'est répandu, comme corollaire, celui de la détente par cascade. A part les grandes machines à balancier, généralement munies de deux cylindres avec distribution Woolf, la détente dans plusieurs cylindres était peu pratiquée jusqu'en 1878, du moins en ce qui concerne les appareils fixes et les locomotives. Actuellement le système compound s'est beaucoup généralisé, même pour les machines sans condensation; un grand nombre d'usines électriques sont mues par des machines compound; l'Exposition de 1889 comportait plusieurs locomotives munies de la détente par cascade; quant à la marine, il y a longtemps qu'elle fait un usage presque exclusif de machines compound; la plupart des machines motrices des

grands navires modernes sont à triple expansion. Mais ce sujet a une trop grande importance pour être traité en passant, et nous aurons l'occasion d'y revenir plus en détail.

La vapeur produite par les générateurs de l'industrie est à l'état de saturation et, dans la plupart des cas, envoyée telle quelle aux machines motrices. On a fait beaucoup d'essais pour réchauffer cette vapeur sur le trajet qui la conduit de la chaudière au cylindre.

Au point de vue économique, la vapeur surchauffée présenterait des avantages incontestables, qui ont été démontrés par la théorie et vérifiés dans des expériences célèbres; il est certain qu'une machine fonctionnant à la vapeur surchauffée consommerait moins de vapeur pour produire un même travail; qu'on pourrait, sans diminuer le rendement, la débarrasser des chemises de vapeur, organes lourds, coûteux, encombrants, dont, avec la vapeur saturée, on est presque obligé d'affubler les cylindres. Malgré tout, la vapeur surchauffée est de moins en moins en usage; si le système, si séduisant en théorie, a jusqu'ici échoué dans la pratique, les raisons en sont toujours les mêmes : on a à redouter les grippements; c'est encore la difficulté des joints et du graissage qui fait obstacle à la solution; le fluide chaud et sec brûle les lubrifiants, pour peu que le degré de surchauffe dépasse certaines limites fort étroites; et il s'écarte presque nécessairement de ces limites dans les irrégularités inévitables d'allure, soit de la machine, soit du foyer.

Arrivons à la question des accidents de chaudières.

Une première et importante constatation à faire, c'est que ces accidents deviennent, d'année en année, moins fréquents. Le fait est d'autant plus digne de remarque, qu'un grand nombre de causes semblent concourir pour augmenter le nombre des accidents : service plus difficile, par suite des sujétions des installations, systèmes nouveaux de générateurs, pression plus élevée, enfin statistique plus complète. Mais, d'autre part, nos connaissances des phénomènes qui se passent dans les chaudières se précisent de jour en jour. En particulier, pour ce qui concerne les explosions, les enquêtes sont faites, en général, avec assez de soins et de compétence pour permettre d'en préciser avec sécurité les causes; la catégorie des explosions dues à des causes inconnues se fait chaque année plus rare. Et tout d'abord, ces phénomènes mystérieux, auxquels on a eu quelquefois recours pour expliquer les accidents de chaudières, ont à peu près disparu de nos enquêtes; il n'est plus question de mélanges détonants, de décharges électriques, d'eau surchauffée, etc. Des recherches décisives ont fait justice de ces hypothèses. D'autre part, la surveillance exercée sur les appareils à vapeur est plus active et plus efficace; à cet égard, les chefs d'industrie comprennent mieux leurs devoirs et leur responsabilité; les chauffeurs se forment et s'instruisent; le personnel si distingué des Mines compense en partie son insuffisance numérique par son activité et ses connais-

sances; enfin les associations de propriétaires d'appareils à vapeur procurent une sécurité réelle aux générateurs qui rentrent dans leur ressort.

Une explosion n'arrive pas toujours subitement; souvent elle ne survient que comme conséquence de détériorations qui se sont produites et accumulées lentement; la chaudière est longtemps malade avant de se détruire. Les maladies des chaudières ont fait, dans ces dernières années, l'objet d'études attentives. Je vais en dire quelques mots.

L'un des accidents les plus fréquents qu'on rencontre, ce sont les corrosions; elles sont extérieures ou intérieures à la chaudière.

Pour ce qui concerne les corrosions extérieures, leur cause générale est aujourd'hui assez bien déterminée : c'est presque toujours l'humidité, que cette humidité provienne des fuites aux joints, du voisinage de nappes d'eau, de suintements dans les maçonneries, ou enfin de condensations sur une paroi froide; sous l'action simultanée des fumées et de l'humidité, la tôle se ronge très vite; cette action est encore bien plus active si les fumées sont sulfureuses, ce qui est le cas lorsque la houille brûlée renferme des pyrites.

Les causes des corrosions intérieures sont beaucoup plus variées et moins bien déterminées. On rencontre quelquefois de ces corrosions qui semblent défier toute explication; dans d'autres cas, on peut, sans trop d'hésitation, en déterminer l'origine. C'est un sujet qui reste sur le chantier, et que d'ailleurs les études des hommes techniques tendent chaque jour à éclairer davantage.

Les coups de feu sont des accidents assez fréquents et dont, le plus souvent, on peut facilement retrouver la cause; le coup de feu se produit au-dessus d'un feu actif, lorsque la transmission de la chaleur à l'eau est gênée. Quant aux obstacles existant sur le trajet de la chaleur, ils peuvent se trouver dans l'épaisseur du métal, tels que pailles, rivures mal faites; ils peuvent aussi se trouver à l'intérieur de la chaudière : citons en premier lieu la baisse du plan d'eau, due à des fuites ou à une alimentation insuffisante; il faut aussi mentionner les incrustations et enfin, dans certains cas, la présence de certains corps gras dans l'eau de la chaudière.

Les fuites et les criques dans la tôle sont des accidents fréquents, qui s'expliquent d'ordinaire sans grande difficulté; ils sont tantôt sans importance, tantôt au contraire très sérieux et exigeant de promptes réparations.

On rencontre encore divers accidents et des altérations variées, dont la provenance est plus ou moins claire. Disons que beaucoup d'accidents sont dus à l'imprudence ou à la négligence de ceux qui sont chargés de la conduite des chaudières.

Les différents accidents auxquels donnent lieu les générateurs ont été présentés, au Champ de Mars, sous une forme extrêmement saisissante, par les associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur; ces associations s'étaient syndiquées pour la circonstance, et présentaient une collection de pièces du plus grand intérêt, constituant une sorte de Musée pathologique des chaudières.

A propos des accidents de chaudières, il ne sera pas inutile de donner ici un court relevé des explosions survenues en France.

Le tableau ci-après est tiré des publications officielles du Ministère des travaux publics; il s'étend depuis 1865, date à laquelle on a commencé à établir une statistique régulière des explosions de chaudières, jusqu'à l'époque actuelle.

EXPLOSIONS DE CHAUDIÈRES EN FRANCE.

PÉRIODES.	NOMBRE MOYEN ANNUEL		POUR 10,000 CHAUDIÈRES.					
			NOMBRE D'ACCIDENTS					NOMBRE de victimes (tués et blessés).
	de chaudières.	d'explosions.	pour conditions défectueuses de construction.	pour conditions défectueuses d'entretien.	pour mauvais emploi des appareils.	pour causes indéterminées.	TOTAL.	
1865-1869.....	33,741	14.6	0.89	1.25	2.13	0.53	4.33	13.57
1870-1874.....	41,618	18.8	1.58	1.73	1.73	0.48	4.52	12.25
1875-1879.....	54,825	24.4	1.20	1.93	1.64	0.18	4.45	10.87
1880-1884.....	70,019	25.0	0.91	1.54	1.68	0.20	3.57	8.57
1885-1889.....	80,250	25.0	0.72	1.34	1.57	0.17	3.12	5.28

Nota. — Ces chiffres ne comprennent pas les appareils de la flotte de l'État.

On remarquera que, d'une période à l'autre et presque sans exception, le nombre d'explosions, comparé au nombre des chaudières en service, va constamment en diminuant et cela dans une proportion rapide; il en est de même du nombre de victimes. En somme, de nos jours, il y a en moyenne, par an, une explosion sur 3,200 chaudières, et une victime sur 1,900 chaudières.

Les données ci-dessus se rapportent à l'ensemble des générateurs existant sur le territoire. Toutefois certaines industries sont particulièrement indemnes : tel est le cas de l'industrie des chemins de fer. Il semblerait, au premier abord, que les locomotives devraient être, plus encore que les autres chaudières, exposées à des accidents; leur construction si délicate, l'activité extrême de leur vaporisation, l'élévation de la pression, les secousses et vibrations en service, toutes ces circonstances semblent ici concourir pour amoindrir la sécurité. En fait, les explosions de locomotives sont excessivement rares; on compte moins d'une explosion pour 40,000 années de service; c'est moins du dixième du chiffre correspondant aux chaudières fixes. Cette immunité remarquable et inattendue est due évidemment à l'organisation très parfaite du service de la traction, à la construction soigneusement contrôlée, à l'entretien minutieux dont ces machines sont l'objet. Ce qui prouve qu'il en est bien ainsi, c'est que les chaudières ressortissant aux associations de propriétaires jouissent, au point de vue des accidents, d'une immunité presque égale : les explosions y sont extrêmement rares.

C'est une démonstration péremptoire des résultats que permet d'atteindre une organisation bien entendue de la surveillance et des visites.

Il est intéressant de se rendre compte du degré de sécurité que peuvent présenter les nouveaux systèmes de chaudières, qui ont pris une si rapide extension dans ces dernières années, à savoir : les générateurs à petits éléments. Quoique le nombre des chaudières de ce type qui sont en service soit loin d'être aussi grand que celui des chaudières ordinaires, elles ne laissent pas que d'avoir donné lieu à quelques accidents. Toutes proportions gardées, les générateurs à petits éléments ont donné plus d'explosions que les autres chaudières; ce qui, du reste, n'a rien de surprenant, étant données la nouveauté et la délicatesse du système. Toutefois, si les accidents sont plus nombreux, ils sont, en général, beaucoup moins graves; de sorte que le nombre de victimes ne dépasse pas la moyenne fournie par les autres types. Quant à la sécurité du voisinage, elle est restée jusqu'ici complète, les explosions n'ayant jamais été accompagnées d'effets dynamiques notables, et les dégâts s'étant toujours restreints au local même des chaudières; ce qui justifie les tolérances octroyées par l'Administration, ainsi que les précautions auxquelles elle a toujours subordonné les dérogations qu'elle accorde.

Nous avons à plusieurs reprises parlé des associations de propriétaires d'appareils à vapeur. Il ne sera pas hors de propos de donner ici quelques indications sur ces associations. Elles ont pour objet principal d'assurer la sécurité dans l'usage des générateurs; elles s'occupent, en outre, d'améliorer les conditions d'emploi des chaudières et machines à vapeur.

En ce qui concerne la sécurité, leurs moyens d'action sont les suivants. Le premier de tous est une étude attentive des accidents, même minimes, et, en général, de toutes les circonstances qui se produisent dans le fonctionnement des générateurs. La surveillance s'exerce par des visites, tant intérieures qu'extérieures. A la suite de chaque visite, il est dressé un procès-verbal constatant les défectuosités de toute nature et indiquant les réparations à faire.

En ce qui concerne le bon emploi des appareils, les inspecteurs s'assurent de l'état des générateurs qu'ils visitent et signalent les améliorations à y apporter; ils rendent compte de l'habileté des chauffeurs.

Plusieurs associations ont fondé des cours professionnels pour les chauffeurs et institué, entre les plus habiles de ces ouvriers, des concours, qui exercent une influence des plus utiles. Les associations se chargent également de contrôler les conditions de marche des machines et de les soumettre à des essais au frein et à l'indicateur.

Ces associations ne datent pas de bien loin; la plus ancienne a été fondée en 1855 par Fairbairn, sous le nom de *Manchester steam users Association*. L'Association alsacienne fut fondée en 1867, sous les auspices de la Société industrielle de Mulhouse.

Aujourd'hui on compte, en France, onze de ces associations, comprenant environ 3,000 propriétaires et étendant leur action sur 12,000 générateurs, soit le septième environ du nombre total de chaudières existant dans notre pays.

Passons à l'étude des matériaux employés dans la construction des chaudières et à celle des procédés de mise en œuvre.

La plupart des chaudières, surtout dans les installations fixes, sont encore construites en tôle de fer. En 1878, on voyait à l'Exposition quelques chaudières en tôle d'acier. Depuis lors, la substitution de l'acier au fer s'est faite lentement, mais d'une manière continue. La plupart des grandes chaudières figurant à l'Exposition de 1889 sont en tôle d'acier. Cette transformation est due à deux causes principales. En premier lieu, le prix de l'acier s'est considérablement abaissé et ne diffère plus beaucoup de celui du fer. En second lieu, on connaît bien mieux aujourd'hui les propriétés de l'acier et les procédés d'emploi de ce métal; les défiances résultant des nombreux mécomptes éprouvés dans des essais prématurés tendent à s'effacer. D'autre part, la métallurgie a fait de très grands progrès, et les forges arrivent à produire à volonté telle qualité d'acier qui leur est demandée, avec une précision et une certitude presque complètes.

Si l'on est parvenu en peu d'années à ces résultats si remarquables, le mérite en revient aussi bien aux consommateurs qu'aux producteurs de l'acier. C'est par une étude approfondie des qualités requises et un contrôle rigoureux des marchandises livrées que les constructeurs ont pu amener les forges à ce degré de précision; les grandes administrations publiques, en définissant avec rigueur, dans leurs cahiers des charges, les qualités de l'acier qu'elles commandent, en contrôlant sévèrement jour par jour la fabrication, ont rendu un service signalé, non seulement à l'industrie en général, mais encore à la métallurgie. Ici, nous voyons apparaître de nouveau l'influence, sur le progrès général, des exigences de la Marine et de la Guerre.

Le contrôle des livraisons se fait à l'aide de méthodes et d'instruments d'une grande puissance et d'une haute précision, dont quelques-uns figuraient à l'Exposition de 1889. Ces procédés de vérification minutieux et d'une exactitude comparable à celle obtenue dans les laboratoires de physique les plus perfectionnés sont devenus d'un usage courant. Malheureusement, les bases du calcul diffèrent d'un pays et même d'une usine à l'autre; une masse de faits est recueillie chaque jour, mais les unités sont très variables, et dès lors la coordination devient impossible. Le Congrès international de mécanique appliquée s'est préoccupé de cette grave question; il s'est efforcé de recommander les mesures propres à ramener l'homogénéité dans les recherches; dans cette direction, il reste à accomplir une unification qui, toutes proportions gardées, aurait une utilité comparable à celle du système métrique.

Pour ce qui concerne les chaudières, l'acier exclusivement employé est l'acier doux, c'est-à-dire un acier possédant à la traction une résistance modérée, s'allongeant beau-

coup avant la rupture, très malléable et ne trempant pas. Les chiffres moyens caractérisant l'acier usité couramment pour la tôle de chaudière sont les suivants :

Résistance à la traction (par millimètre carré).....	38 à 42 kilogrammes.
Allongement à la rupture (mesuré sur 200 millimètres)...	20 à 25 p. 100.

Il y avait, dans les galeries de l'Exposition, un certain nombre de chaudières construites en acier. Citons les magnifiques spécimens présentés par la maison Meunier et Cie, de Lille; par Fontaine et Cie, de la Madeleine, près Lille; et enfin, dans la section anglaise, la splendide exposition de la maison Galloway et fils, comportant une chaudière du type inventé par cette maison et d'une exécution superbe.

Ce qu'il y a de remarquable, dans ces belles chaudières, c'est moins encore la matière dont elles sont constituées que la façon dont cette matière est mise en œuvre. L'acier entrant dans une construction de ce genre ne doit pas être traité comme le fer. La tôle de fer, obtenue par la soudure des mises qui composent le paquet, est loin d'être homogène; les fibres offrent des résistances et des allongements variables, et forment entre elles comme une sorte de feutrage; c'est une matière un peu grossière et qui peut être traitée avec une certaine brutalité. L'acier, métal homogène, est une matière délicate, qui ne résisterait pas aux procédés qui s'adaptent fort bien à la chaudronnerie en fer; il faut des précautions sévères pour éviter les criques et les trempes locales; le perçage des trous de rivets, le forgeage des pièces embouties, les proportions des rivures exigent des soins particuliers et constituent une technologie spéciale, qui n'a pu s'établir qu'à la suite d'expériences et d'observations prolongées. Il ne faut pas oublier que l'emploi de l'acier dans les chaudières, proposé pour la première fois en 1855, a donné lieu aux plus graves mécomptes.

L'épaisseur de la tôle d'acier est moindre, toutes choses égales, que celle que l'on donnerait à la tôle de fer; c'est la raison même de l'emploi d'un métal plus cher et plus résistant. Mais, pour que la paroi conserve une résistance suffisante, il importe que la rivure ne vienne pas trop l'affaiblir.

Les rivures sur tôle d'acier se font presque toujours à deux rangs de rivets, souvent aussi à couvre-joint ou même à double couvre-joint, avec plusieurs rangs de rivets de part et d'autre du joint.

Quant à la confection de la rivure, l'emploi des machines à river est devenu général. La rivure mécanique, la seule praticable dans le cas de très gros rivets, présente, dans tous les cas, des avantages sérieux comme bonne exécution, régularité du travail et sécurité du résultat.

Les habitudes d'exactitude dans l'exécution, qui sont, en matière de mécanique, la caractéristique de l'époque actuelle, se sont répandues dans les ateliers de chaudronnerie; la construction d'une chaudière, dans les bonnes maisons, est œuvre de précision; les procédés autrefois en usage pour rattraper ou masquer les erreurs du traçage

ou du poinçonnage ne sont plus de mise; ils seraient d'ailleurs inapplicables à une matière aussi délicate que l'acier.

Des essais ont été tentés depuis fort longtemps pour remplacer, dans certains cas, la rivure par la soudure. Ce serait évidemment un progrès considérable, si l'on pouvait rétablir la continuité et la régularité de formes d'une paroi de chaudière, en évitant les faiblesses locales qui résultent de la présence des coutures par rivets. Mais, en ce qui concerne la soudure des tôles, les difficultés sont grandes, même pour le fer, à plus forte raison pour l'acier; d'autre part, le travail est toujours un peu incertain, il dépend de l'habileté du forgeron, et quelques accidents survenus à des soudures ont rendu ce mode d'assemblage un peu suspect.

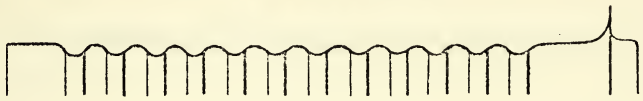
Déjà, en 1878, la maison Imbert frères, de Saint-Chamond (Loire), présentait des spécimens fort remarquables de tôles soudées; la même maison produit, en 1889, de petites chaudières soudées, qui paraissent fort réussies. On trouve de beaux échantillons de tôles soudées dans l'exposition de Davey, Paxman et Cie (Grande-Bretagne).

La maison Galloway et fils (Grande-Bretagne) fabrique en tôle soudée les tubes bouilleurs qui servent d'entretoises au grand carneau de ses chaudières.

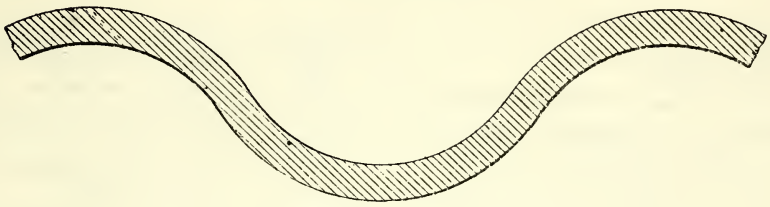
En matière de grosse chaudronnerie soudée, la plus belle exposition était incontestablement celle de la Leeds Forge Cy (Grande-Bretagne); cette exposition mesure un progrès important dans les procédés de forgeage des tôles de fer et d'acier. Je ne parlerai pas des admirables pièces pour matériel de chemin de fer, de ces magnifiques longerons de locomotives, aux formes si simples et si rationnelles, à la fois légères et résistantes, constituées par une tôle d'acier emboutie, aux bords relevés à angle droit, contournant la rive du longeron et les échancrures compliquées des boîtes à graisse. Mais il est utile, à propos des chaudières, d'insister sur les tubes-foyers du système *Fox,* qui sont aujourd'hui en usage dans un grand nombre de générateurs à foyer intérieur. Ces tubes avaient déjà fait leur apparition en 1878 et avaient excité un vif intérêt; mais leur fabrication a été considérablement perfectionnée, et les spécimens réunis dans l'exposition de la Leeds Forge Cy étaient des plus remarquables. On sait à quel genre d'accidents sont exposés les tubes-foyers employés dans les chaudières à foyer intérieur : sous l'action de la pression s'exerçant du dehors au dedans, le tube-foyer tend à se déformer et à s'aplatir. Pour prévenir ce danger, on donne à ces cylindres une grande épaisseur; de plus, on les arme de renforts circulaires, échelonnés de distance en distance suivant la section droite du cylindre.

La solution imaginée par M. Fox, directeur de la Leeds Forge Cy, est beaucoup plus sûre, plus élégante et plus pratique. Le cylindre constituant le tube-foyer, au lieu d'être lisse, est armé d'une série de cannelures transversales, donnant à la coupe de la paroi la forme d'une sorte de sinusoïde (fig. 2). On voit immédiatement les avantages de cette disposition : le tube n'est plus exposé à s'écraser sous la pression, il possède une certaine élasticité longitudinale, enfin la surface de chauffe est augmentée

dans une proportion notable. La figure 3 représente une chaudière marine munie de tubes Fox, et la figure 4 est la perspective avec coupe d'un fragment de devanture de chaudière marine portant quatre tubes Fox.



Coupe de la partie supérieure d'un tube.



Détail d'une ondulation.

Fig. 2. — Tubes-foyers, système Fox, construits par la Leeds Forge Cᵉ.

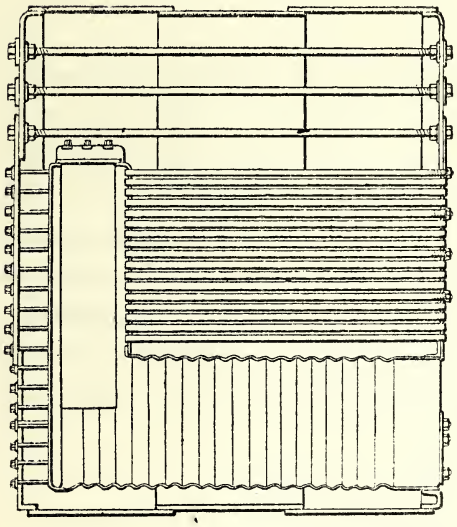


Fig. 3. — Application à une chaudière marine.

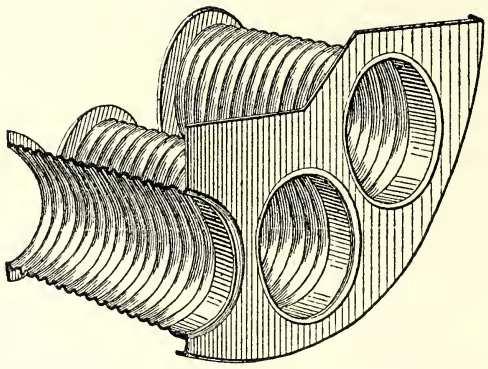


Fig. 4. — Coupe et perspective d'un foyer quadruple.

La fabrication de ces tubes est extrêmement remarquable; ils sont formés de tôle d'acier doux, que l'on cintre et dont on soude les bords; le tube lisse ainsi constitué est porté au rouge et soumis à l'action d'un puissant laminoir, dont les cylindres sont cannelés; un agencement particulier permet l'entrée et la sortie de la pièce. Les tubes Fox exposés étaient d'une correction de formes absolument parfaite.

Nous allons maintenant aborder l'examen de quelques-unes des chaudières qui figuraient à l'Exposition.

SECTION II.

PRINCIPALES CHAUDIÈRES DE L'EXPOSITION.

SOMMAIRE.

Objet et division.

Chaudières à foyer extérieur.

Chaudières à foyer intérieur. — Chaudière Galloway.

Chaudières tubulaires. — Généralités. — Tubes amovibles, systèmes Bérendorf, Montupet, Girard. — Chaudière de Davey, Paxman et Cie. — Chaudières semi-tubulaires. — Exposition de Meunier et Cie, de L. Fontaine. — Chaudières à foyer amovible. — Chaudières de Weyher et Richemond, de la Compagnie de Fives-Lille.

Chaudières avec tubes bouilleurs. — Type Field et variétés. — Chaudières d'Imbert frères, de Dulac, de Dubenne. — Chaudière de de Dion, Bouton et Trépardou.

Chaudières à petits éléments. — Généralités; dénominations. — Origines. — Sécurité. — Autres propriétés. — Détails de construction. — Division.

Chaudières à petits éléments avec réservoir. — Chaudières de Babcock et Wilcox, de de Naeyer, de Lagosse et Bouché, de Terme et Deharbe, de Collet, de Roser, d'Oriolle, d'Hanrez.

Chaudières à petits éléments sans réservoir. — Chaudière de Belleville; construction; régulateur de pression; alimentation; séchage de la vapeur; épuration de l'eau.

Moteur Serpollet.

Nous avons passé en revue, dans la section précédente, les caractères généraux les plus importants par lesquels les chaudières actuelles se distinguent de celles qui se construisaient en 1878. Actuellement, nous allons faire une description rapide des principales chaudières qui figuraient à l'Exposition de 1889. Ces chaudières étaient fort nombreuses et de types extrêmement variés; elles étaient destinées aux usages les plus divers, et des idées fort différentes avaient présidé à leur construction. Il serait bien difficile d'établir une classification absolument irréprochable de tous ces appareils. Nous les décrirons dans un ordre qui semble assez rationnel, en prenant pour base le volume de la chaudière et en commençant par les chaudières à grand volume. Cet ordre est indiqué par le tableau ci-après:

Chaudières à grand volume: à foyer extérieur; à foyer intérieur.
Chaudières à volume moyen: tubulaires; à tubes bouilleurs.
Chaudières à petits éléments: avec réservoir d'eau et de vapeur; sans réservoir.
Chaudières mixtes et diverses.

Cette classification ressort de la nature des services que peuvent rendre les différents systèmes de générateurs et de leurs conditions d'installation. Les grandes chaudières, par suite des dangers qui peuvent résulter de leur présence pour le voisinage, ne peuvent être établies qu'à une certaine distance des locaux habités; mais ce sont des appareils simples et robustes, dont la conduite n'exige ni connaissances ni précautions spéciales. Les chaudières à petits éléments ne sont pas soumises, dans leur installation,

à des conditions aussi restrictives; elles ne font courir aucun risque sérieux aux voisins; mais ce sont des engins délicats, qui ne peuvent être mis qu'entre les mains d'ouvriers soigneux et instruits.

De toutes les chaudières à grand volume, la plus employée dans notre pays, c'est la chaudière à bouilleurs, dite *chaudière française*. Cette chaudière occupe beaucoup de place, elle exige un fourneau assez dispendieux; mais elle est simple de construction, facile à conduire, durable; elle s'accommode d'un entretien ordinaire, d'eaux de médiocre qualité; elle offre beaucoup de sécurité, elle est peu exposée aux coups de feu, elle permet l'emploi de grilles de grande dimension, et enfin, propriété d'une haute importance, elle est facilement accessible dans toutes ses parties à l'œil et à l'outil, ce qui rend les visites et les réparations faciles. Elle demeure encore, par excellence, la chaudière des grandes usines, établies hors des villes sur des terrains de faible valeur.

Les formes et dispositions bien connues de ce type de chaudière n'ont pas changé depuis fort longtemps; c'est toujours un gros corps cylindrique, surmontant un, deux ou au plus trois bouilleurs également en grosse chaudronnerie, et auxquels il est réuni par des cuissards offrant au passage de l'eau et de la vapeur de larges orifices.

On a essayé bien souvent de créer des variétés de ce type primitif. Parmi ces tentatives, dont quelques-unes figuraient à l'Exposition, on peut citer celles dans lesquelles on s'est efforcé de diminuer le poids du gros corps cylindrique supérieur, en le divisant en plusieurs cylindres de plus petit diamètre; la chaudière ne se compose plus que d'un certain nombre de corps ayant les proportions d'un bouilleur ordinaire, les uns plongés dans les flammes, les autres servant de réservoir de vapeur; ils sont réunis entre eux par des tuyaux extérieurs. Ces tentatives ont eu rarement quelques succès. On connaît le point faible d'un système pareil : c'est que, les communications ne s'établissant que par des conduites de bien moindre section que les cuissards ordinaires, il peut se produire, entre les divers corps, des dénivellations du plan d'eau extrêmement dangereuses. On en est généralement revenu à la disposition de chaudières à bouilleurs, laquelle a l'avantage d'être consacrée par une longue pratique.

Les différents types de chaudières à foyer intérieur sont aussi fort usités dans les grandes usines; on les fait en général à un ou deux tubes-foyers. Ces chaudières sont moins encombrantes, leur fourneau est moins volumineux et moins dispendieux. Par contre, leur construction est plus difficile et exige plus de soins, surtout pour l'établissement des tubes-foyers, lesquels, recevant la pression par l'extérieur, ne sont pas placés dans de bonnes conditions de résistance; la visite et le nettoyage de la partie basse placée au-dessous des foyers est souvent incommode; ces foyers, dont le dessus est à une faible hauteur au-dessous du niveau normal de l'eau, sont exposés à se brûler dès que le plan d'eau vient à baisser; les flammes se développent mal dans une chambre de combustion trop petite. Mais le plus grave inconvénient que présentent

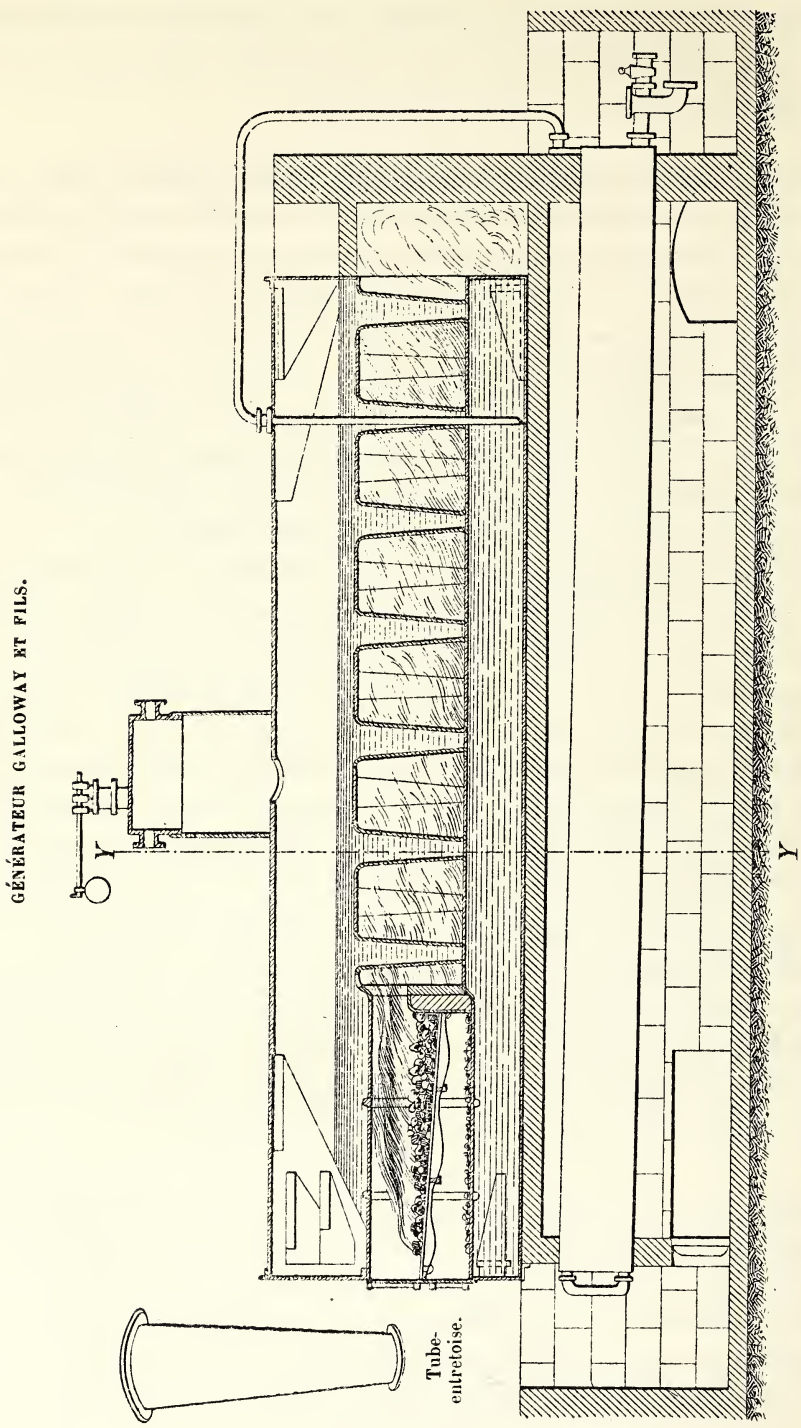


Fig. 5. — Coupe longitudinale.

ces chaudières dans le service, c'est la largeur nécessairement restreinte de la grille, ce qui conduit, dans beaucoup de cas, à donner à la combustion une allure active et rend la conduite du feu moins commode.

Parmi les chaudières à foyer intérieur qui ont reçu des applications nombreuses, il faut citer le générateur imaginé par MM. Galloway et fils, de Manchester. Cette chaudière ainsi qu'une belle machine motrice exécutée par la même maison figuraient déjà à l'Exposition de 1878.

MM. Galloway, après avoir créé un système de générateur répondant d'une manière satisfaisante aux exigences générales des usines ordinaires, ont eu le bon esprit de s'en tenir aux dispositions qui avaient si bien réussi; ils se sont attachés à améliorer les détails, à rendre la construction plus parfaite; la chaudière qu'ils présentaient à l'Exposition de 1889 était une œuvre mécanique de la plus haute valeur.

Je vais décrire rapidement la chaudière Galloway (fig. 5 et 6) :

Elle se compose d'un grand corps cylindrique horizontal, terminé par des fonds plats fortement armés, et enveloppant deux tubes-foyers; ces tubes-foyers ne traversent pas la chaudière dans toute sa longueur, comme dans les types ordinaires; ils n'ont que la longueur de la grille, et viennent aboutir à un carneau commun, entouré, comme les foyers, par l'eau de la chaudière. Ce carneau présente, en coupe transversale (fig. 6), une section ovale; cette forme manque par elle-même de résistance; mais, pour rendre à ce carneau la solidité qui lui fait défaut, on a entretoisé les deux faces inférieure et supérieure par une série de tubes disposés en quinconce et communiquant haut et bas avec l'eau de la chaudière; la paroi de ces tubes-entretoises fait partie de la surface de chauffe de la chaudière, qu'elle augmente dans une forte proportion; la disposition en quinconce a pour effet de briser le courant de flammes et d'y produire des remous favorables à la transmission de la chaleur.

GÉNÉRATEUR GALLOWAY ET FILS.

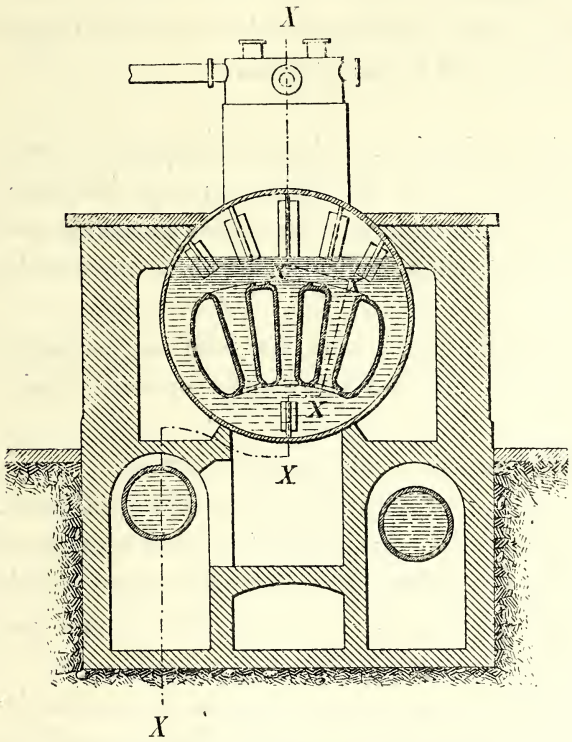


Fig. 6. — Coupe transversale suivant *YY*.

C'est dans la construction et l'agencement des tubes-entretoises que résident l'originalité et l'avantage du système. Ils sont en tôle soudée et leurs bords, relevés en collerettes, s'assemblent par rivets sur les tôles du carneau; leur forme est conique, de telle sorte que la collerette du bas, plus étroite, puisse passer à travers le trou pratiqué dans le plafond du carneau; le changement d'un de ces tubes est très facile : il suffit de

IMPRIMERIE NATIONALE.

couper les têtes de rivets; le tube avarié s'enlève, la mise en place du tube neuf se fait sans difficulté et l'assemblage s'obtient à l'aide de rivets. Tous les tubes-entretoises sont interchangeables, ce qui réduit notablement l'approvisionnement des rechanges; à cet effet, les deux parois auxquelles s'assemblent les tubes ont reçu des courbures concentriques; la courbure de la paroi inférieure a pour résultat de dégager le bas de la chaudière, ce qui facilite beaucoup les visites intérieures.

La chaudière représentée dans les figures 5 et 6 est munie de deux corps de réchauffeurs d'eau d'alimentation en forme de bouilleurs; cet accessoire peut être supprimé ou remplacé par des réchauffeurs tubulaires. MM. Galloway exposaient un ensemble de deux tubes-foyers et d'un carneau, le tout en acier et d'une exécution de premier ordre. Du reste, la fabrication de MM. Galloway est installée sur un pied grandiose; la plupart des opérations s'y font mécaniquement; les ateliers livrent annuellement plus de 300 chaudières entièrement terminées.

Rappelons ici que la maison Galloway a fourni à la direction des travaux de l'Exposition les appareils illuminant la grande gerbe du bassin octogonal.

Nous arrivons maintenant aux chaudières tubulaires. La disposition type de ces sortes de générateurs est la chaudière de locomotive; sous cette forme, ou sous des formes voisines, elle se prête aux applications réclamant à la fois une grande puissance, une grande légèreté et un faible encombrement; citons seulement les locomotives et les générateurs marins.

Mais c'est comme chaudière de locomotive que la chaudière tubulaire a reçu ses applications les plus nombreuses. La question est assez importante pour mériter qu'on l'examine de plus près.

La chaudière tubulaire a été employée exclusivement pour faire la traction sur les chemins de fer, depuis le jour où la première locomotive à grande vitesse, la *Rocket*, de G. Stephenson, circula sur des rails. Il y a donc aujourd'hui près de trois quarts de siècle que le dispositif imaginé par Marc Seguin ne cesse de faire ses preuves et de rendre à l'humanité ces services incomparables, qui ont eu pour effet de transformer de fond en comble la civilisation moderne.

Aujourd'hui encore, la chaudière tubulaire est en possession absolue de tous les chemins de fer. En sera-t-il encore longtemps ainsi? C'est une question qu'il est permis de se poser et au sujet de laquelle il peut s'élever quelque doute.

Le problème de la traction sur les chemins de fer se pose en des termes extrêmement étroits et rigoureux. Il y a d'abord les conditions économiques; l'appareil de traction doit être très puissant, mais en même temps aussi léger que possible, de manière à réduire d'autant le poids mort à traîner. Mais il y a aussi les conditions techniques, et ce sont peut-être les plus gênantes : la locomotive doit s'inscrire dans un gabarit strictement mesuré; en outre, elle roule sur une voie dont la largeur est absolument déterminée, 1 m. 44; toutes les voies des grands chemins de fer, dans toutes

les nations du monde entier, à part une ou deux exceptions, sont construites sur cette largeur.

La voie normale et la chaudière tubulaire, avec tirage par l'échappement, ont répondu pendant longtemps à toutes les exigences de la traction. Cependant le trafic des chemins de fer allait en augmentant et prenait une activité dépassant toutes les prévisions possibles. Certaines lignes se trouvèrent chargées à un point tel, que la circulation y devenait dangereuse. On s'efforça d'écarter le danger des collisions à l'aide de divers dispositifs éminemment ingénieux; on mit entre les mains des mécaniciens des moyens d'arrêt extrêmement prompts et puissants; on disposa des systèmes de signaux d'une admirable exactitude; l'électricité fut appelée à prêter le concours de son incommensurable vitesse. Enfin, dans certaines directions, où le trafic avait atteint une intensité telle, que tous ces moyens réunis devenaient eux-mêmes impuissants, il fallut accepter un expédient radical, mais d'un prix exorbitant : on dut se résigner à doubler les voies, ou à construire des lignes parallèles à celles déjà existantes.

Parmi les procédés ayant pour objet de desservir un trafic actif, sans courir le risque de jeter les convois les uns sur les autres, il en est un qui se présente de lui-même et que les ingénieurs se sont ingéniés à développer jusqu'à la limite du possible : il consiste, pour les trains de vitesse, à augmenter la charge des trains, de manière à pouvoir les espacer davantage sans réduire la masse totale transportée; pour les trains de marchandises, à augmenter leur vitesse de marche, de telle sorte qu'elle se rapproche de la vitesse des trains de voyageurs entre lesquels ils sont intercalés. Ces deux problèmes se réduisent à un seul : accroître la puissance de l'agent de traction, ou, autrement dit, celle de la chaudière qui alimente la locomotive. Or la puissance de vaporisation d'une chaudière dépend directement de celle de son foyer, c'est-à-dire de la quantité de charbon qu'on y peut brûler dans l'unité du temps. Dans les locomotives, la combustion est extrêmement vive, par l'effet du tirage actif produit par l'échappement; de sorte que, dans un foyer de dimensions modérées, on peut brûler des quantités de charbon considérables, six ou huit fois plus que dans un foyer ordinaire de chaudière fixe. Pour augmenter la puissance du foyer, on s'ingénia à en accroître les dimensions; mais on s'aperçut bientôt qu'au delà de certaines limites, la puissance cesse de croître en proportion de l'aire de la grille : c'est que, lorsque la grille est un peu grande, il intervient un nouvel élément.

Les flammes et les gaz de la combustion, après s'être échappés du charbon, s'engagent dans les tubes calorifères et les traversent d'un bout à l'autre, pour arriver dans la boîte à fumée et, de là, à la cheminée. Au passage de ces tubes, les gaz prennent une vitesse très grande, en relation avec la dépression produite dans la boîte à fumée par l'action du tirage. Toutes choses égales, le volume de gaz débité est en proportion de la section libre offerte par les tubes calorifères; si donc cette section est petite, le débit des gaz est faible, et il en est de même de la quantité de charbon brûlée à l'heure. On voit en définitive que, pour augmenter la puissance d'une loco-

motive, il faut donner au passage des gaz dans les tubes calorifères une section aussi large que possible, et proportionner en conséquence la grille, la cheminée, la surface de chauffe et autres organes de la machine.

Tant qu'il ne s'est agi que de traîner des convois modérément chargés ou à une vitesse restreinte, on a pu, sans trop de peine, donner à ces divers éléments des dimensions suffisantes; c'est ainsi qu'on est parvenu, d'année en année, à accroître la puissance des locomotives et, en fin de compte, à établir ces magnifiques engins qu'on admirait à l'Exposition dans la classe des chemins de fer; aujourd'hui, sans qu'on soit peut-être parvenu à la limite, il semble qu'on n'en soit plus bien éloigné; il paraît à peu près certain que la chaudière tubulaire, telle qu'on la construit pour les locomotives de chemin de fer, ne peut pas donner beaucoup plus que ce qu'on lui fait produire à l'époque actuelle.

Mais pourquoi, si l'on a besoin de locomotives plus puissantes, ne pas persévérer dans la voie que les ingénieurs ont suivie jusqu'ici avec de si brillants succès? Pourquoi ne pas augmenter encore, et les dimensions des divers organes, et notamment la section offerte par les tubes au passage des gaz chauds? C'est ici que se présente l'obstacle : le nombre des tubes, et par suite leur section, ne peut pas être accru indéfiniment, parce que l'on rencontre pour limite le diamètre du corps de chaudière, qui lui-même est limité, de proche en proche, par la largeur même de la voie, largeur inflexible, uniforme, fait acquis et sur lequel il est désormais impossible de revenir. Avec cette largeur de voie et la chaudière tubulaire, on pourra sans doute établir des locomotives encore plus puissantes que celles que l'on construit aujourd'hui, mais il ne reste plus beaucoup à gagner, et la chaudière tubulaire paraît bien près, dans cette direction, d'avoir dit son dernier mot. Et cependant le problème est tellement important, tellement urgent, posé en des termes si précis, qu'il faudra bien qu'une solution intervienne. On doit s'attendre à de prochaines recherches, ayant pour objet de substituer à la chaudière tubulaire d'autres systèmes permettant d'augmenter la puissance, c'est-à-dire la consommation de charbon, sans sacrifier la légèreté.

Jusqu'ici le problème n'a pas encore été abordé pour les chemins de fer; mais il a été étudié et résolu dans bien des cas pour la marine, dont les appareils moteurs sont soumis à des sujétions de même nature. Le système des générateurs à petits éléments tend chaque jour à prendre plus de place dans les constructions navales, et l'Exposition offrait de magnifiques exemples de ce genre d'applications. Le progrès est surtout notable pour les torpilleurs; dans ces petits bâtiments, où toutes les puissances sont tendues à leur extrême expansion, la chaudière tubulaire s'est montrée insuffisante; de nouveaux systèmes se sont fait jour, qui reposent eux-mêmes sur le principe des chaudières à petits éléments, poussé à sa suprême exagération. L'avenir prochain nous dira ce que valent ces constructions, qui eussent paru, il y a peu d'années, déraisonnables et exorbitantes. Mais, pour ce qui concerne la mécanique, nous trouvons ici un nouvel exemple de l'influence que peuvent exercer les nécessités implacables de la

marine et de la guerre, devant lesquelles les limites de l'impossible semblent reculer d'une année à l'autre.

La chaudière tubulaire est à la fois puissante, légère et peu encombrante; ce sont là les qualités essentielles qui l'ont imposée dans les chemins de fer et dans la marine. D'autre part, sa surface rayonnante est très petite comparée à sa puissance de vaporisation; ce qui fait qu'au point de vue du rendement, elle est égale, sinon supérieure, aux chaudières à allure lente. Toutefois, à côté de ces avantages, elle ne laisse pas que de présenter des inconvénients sérieux. Le plus grave de tous, peut-être, est que les visites et nettoyages intérieurs sont fort difficiles; les hommes ne peuvent pénétrer dans le corps de chaudière, encombré de tubes et d'armatures; les lames d'eau qui entourent le foyer sont de même inaccessibles. En dépit des expédients ingénieux qu'on a imaginés pour tourner cette grave difficulté, la mise au levage des locomotives s'impose, à des intervalles fort rapprochés et après des durées assez courtes de service effectif; je laisse de côté les autres inconvénients inhérents à tous les systèmes de chaudières à faible volume d'eau : instabilité de la pression et du plan d'eau, conduite plus délicate et plus assujettissante, etc.

Dans les chemins de fer, lorsqu'on veut pénétrer dans une chaudière pour la nettoyer, il faut y pratiquer des passages; à cet effet, on enlève un certain nombre de tubes, en les mâchant par les bouts; les tubes ainsi sacrifiés sont renvoyés au magasin et affranchis, pour être, suivant les cas, ou employés dans des chaudières plus courtes, ou raboutés. Mais ce sont là des moyens qui ne sont pas à la portée des industries ordinaires.

On s'est ingénié pour rendre mobiles les tubes calorifères, de telle sorte qu'on pût les mettre en place et les retirer à l'aide des moyens dont dispose un atelier ordinaire. Les expédients imaginés pour arriver à ce résultat sont fort nombreux. Dans le système Bérendorf (fig. 7), qui était déjà représenté à l'Exposition de 1878, les bouts du tube sont garnis de bagues coniques, *aa*, *bb*, qui entrent à force dans les ouvertures de même conicité, fraisées dans les plaques tubulaires; un effort en sens contraire suffit pour dégager à la fois les deux cônes. Le système donne quelquefois lieu à des fuites, dues à l'élasticité des plaques tubulaires, qui cèdent et ne serrent pas également. Quelques constructeurs évitent cet inconvénient en constituant la tubulure par un ensemble de tubes fixes et quelques tubes mobiles Bérendorf, ces derniers étant répartis de manière à procurer des passages praticables.

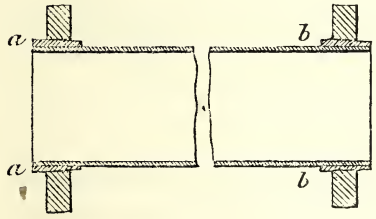


Fig. 7. — Tube mobile, système Bérendorf.

On a, à plus d'une reprise, essayé l'amiante pour faire le joint entre les tubes mobiles et la plaque tubulaire. M. A. Montupet, de Paris, donne à ce dispositif une forme nouvelle, représentée par la figure 8 ci-après. Du côté du foyer, le tube porte une

bague conique *aa*, entrant dans une ouverture de même forme fraisée dans la plaque tubulaire. Du côté de la boîte à fumée, le joint se fait à l'amiante; à cet effet, le tube est rétreint suivant *bb*; on entoure le bout d'amiante filé, et on le coiffe d'un écrou percé en bronze, qui vient mordre dans des filets taraudés dans la plaque tubulaire;

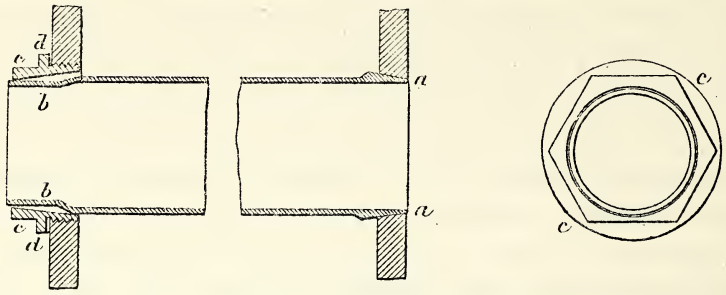


Fig. 8. — Tube mobile, système Montupet.

le joint de l'écrou sur la plaque se fait par une bague en plomb *dd*, qui s'écrase sous la pression. Ce dispositif gêne peu la dilatation; de plus, la pression de la vapeur tend à appuyer le cône *aa* dans son logement. Par contre, les tubes ainsi disposés ne forment pas entretoise entre les deux plaques tubulaires; il convient donc de les répartir entre des tubes fixes, suivant la disposition indiquée plus haut pour les tubes Bérendorf.

Voici (fig. 9) un autre dispositif de joint à l'amiante, proposé par M. Girard (Armand), de Paris. La figure ci-dessous représente le tube avec l'outil servant à le mettre en place; les bagues doublement coniques *bb*, sous la pression des deux écrous *cc*, font serrage à la fois sur l'amiante, qui entoure les bouts des tubes, et sur le loge-

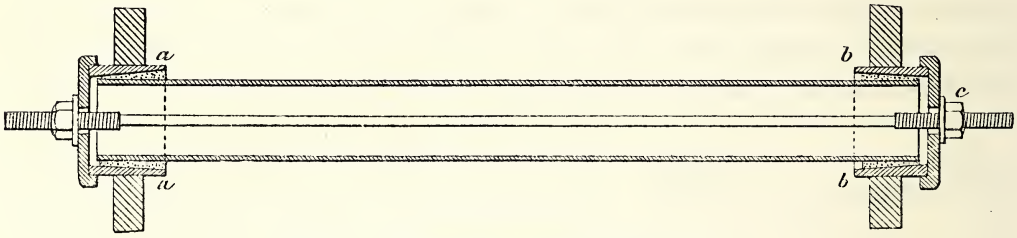


Fig. 9. — Tube mobile, système Armand Girard.

ment ménagé dans la plaque tubulaire. L'outil de mise en place une fois retiré, les garnitures d'amiante, grâce à leur forme conique, font joint autoclave sous la pression de la vapeur. Ainsi qu'avec le système précédent, les tubes ne forment pas entretoise entre les deux plaques tubulaires.

La chaudière tubulaire, forme locomotive, figurait à l'Exposition dans l'importante usine établie par MM. Davey, Paxman et Cie, de Colchester (Angleterre). Cette usine était installée dans la cour des stations d'électricité, entre le palais des Machines et

les galeries des Industries diverses; elle comportait neuf générateurs en feu, affectés, quatre au service de la section anglaise et de la section américaine, cinq au service de la station d'électricité Gramme. Voici les dimensions principales de ces générateurs :

Diamètre du corps cylindrique		1^m 346
Foyer.	Largeur	1 179
	Longueur	1 524
Nombre de tubes		100
Longueur totale de la chaudière		5^m 590
Timbre		8^k 000

Ces chaudières sont en tôle d'acier; elles étaient chauffées par des foyers à chargement continu, du système Alexis Godillot, et desservies par une cheminée de 37 mètres de hauteur et de 2 m. 95 de diamètre intérieur minimum.

La chaudière de locomotive n'est pas d'un usage très commun dans les installations fixes; on lui reproche, pour ces sortes d'applications, sa construction délicate et compliquée, son nettoyage difficile, et le peu de volume de ses réservoirs d'eau et de vapeur, ce qui rend instable la pression et provoque des entraînements d'eau. Lorsque l'on est un peu gêné par le défaut de place, on a fréquemment recours au système mixte, désigné sous le nom de *générateur semi-tubulaire*. C'est une chaudière à bouilleurs, dont le corps cylindrique est traversé par des tubes formant retours de flammes. Les inconvénients que nous venons de signaler dans le type locomotive sont ici très atténués; et même, pour cette application, la section restreinte offerte par les tubes au passage des gaz peut être considérée comme un avantage : le tirage étant nécessairement limité, on n'a plus à craindre, dans un moment de presse, de voir pousser la combustion avec une vivacité exagérée, ce qui, comme on le sait, peut avoir les résultats les plus fâcheux pour la conservation des chaudières.

Plusieurs maisons du Nord présentaient des chaudières semi-tubulaires, dont l'exécution était remarquable. Citons en premier lieu les magnifiques spécimens de chaudières exposés par la maison Meunier et Cie, de Fives-Lille (Nord). Ces chaudières appellent l'attention, moins par leurs dispositions générales, qui rappellent des types bien connus, que par l'exécution, qui est tout à fait hors ligne. Le métal adopté est l'acier doux, en feuilles assez grandes pour ne donner qu'une couture par virole; les rivures longitudinales sont à deux rangs en quinconce, et, pour les grandes chaudières, à couvre-joint, avec quatre rangs de rivets; les trous des rivets sont forés à la mèche sur les tôles mises en place, et les bavures enlevées à la fraise; les garnitures sont montées sur piètements en fonte, rivés sur le corps de chaudière avec interposition d'une feuille de cuivre pour faire joint. Presque toutes les opérations, y compris la rivure, sont exécutées mécaniquement. Quelques coupes de rivures présentées à l'Exposition montraient l'exécution parfaite de cet assemblage important.

Parmi les générateurs exposés par cette importante maison, nous pouvons citer les suivants :

Un générateur semi-tubulaire, composé de deux bouilleurs et d'un corps cylindrique tubulaire, surmonté d'un réservoir de vapeur cylindrique et horizontal; voici les dimensions principales de cette puissante chaudière :

Bouilleurs	Diamètre intérieur	0^m 900
	Longueur	7 800
Corps tubulaire	Diamètre intérieur	2 000
	Longueur	5 700
Tubes	Diamètre extérieur	0 100
	Nombre	124
Réservoir de vapeur	Diamètre intérieur	1^m 550
	Longueur	3 600
Surface de chauffe		282^{mq}

Un autre générateur semi-tubulaire présentait une surface de chauffe de 100 mètres carrés environ.

Enfin la même maison exposait des chaudières de divers types, notamment une chaudière Field à foyer soudé, toutes d'une exécution supérieure, et une collection des spécimens de fers, d'aciers, de rivures, de joints, etc., démontrant l'excellence des matériaux employés et la perfection de leur mise en œuvre.

M. L. Fontaine, à la Madeleine-lez-Lille (Nord), exposait diverses chaudières, parmi lesquelles un générateur semi-tubulaire, lequel était en service et alimentait plusieurs des machines motrices de l'Exposition. Toutes ces constructions étaient établies en acier doux et fort soignées. On remarquait notamment l'exclusion complète de la fonte, qui a déjà donné lieu à de si nombreux accidents; les trous d'homme sont en tôle d'acier emboutie et dressée sur les bords, lesquels s'appliquent sur des portées également en acier doux. La chaudière en feu était accompagnée d'un réchauffeur tubulaire de l'eau d'alimentation.

Lorsque les emplacements dont on dispose sont tout à fait restreints, il faut bien revenir à la chaudière tubulaire simple à foyer intérieur. Toutefois les difficultés du nettoyage, surtout si l'on a affaire à des eaux incrustantes, sont tellement grandes que l'on s'est efforcé de les tourner. Nous avons ci-dessus indiqué un procédé, les tubes mobiles. Une autre solution, plus radicale, consiste à rendre amovible tout l'ensemble du foyer et des tubes, ce qu'on nomme le *calorifère*. La chaudière se compose de deux parties, le calorifère d'une part, l'enveloppe extérieure de la chaudière ou *calandre* de l'autre. Les deux parties sont réunies par un joint. Ce joint démonté, on retire le calorifère de la calandre et on peut le visiter et le nettoyer tout à l'aise.

L'idée de ces chaudières à foyer amovible est déjà ancienne; elle a été brevetée, il

y a quelque trente ans, au nom de MM. Thomas, Laurens et Pérignon. Le succès ne vint pas tout de suite; on eut surtout assez de peine à obtenir un bon joint pour réunir les deux parties de la chaudière. Mais les difficultés finirent par être surmontées, et l'on trouve aujourd'hui dans l'industrie un grand nombre de générateurs procédant de cette idée; ils diffèrent d'ailleurs entre eux, non seulement par les détails, mais même par les dispositions d'ensemble. Nous donnons ci-après la description sommaire de deux générateurs à foyer amovible qui figuraient au Champ de Mars.

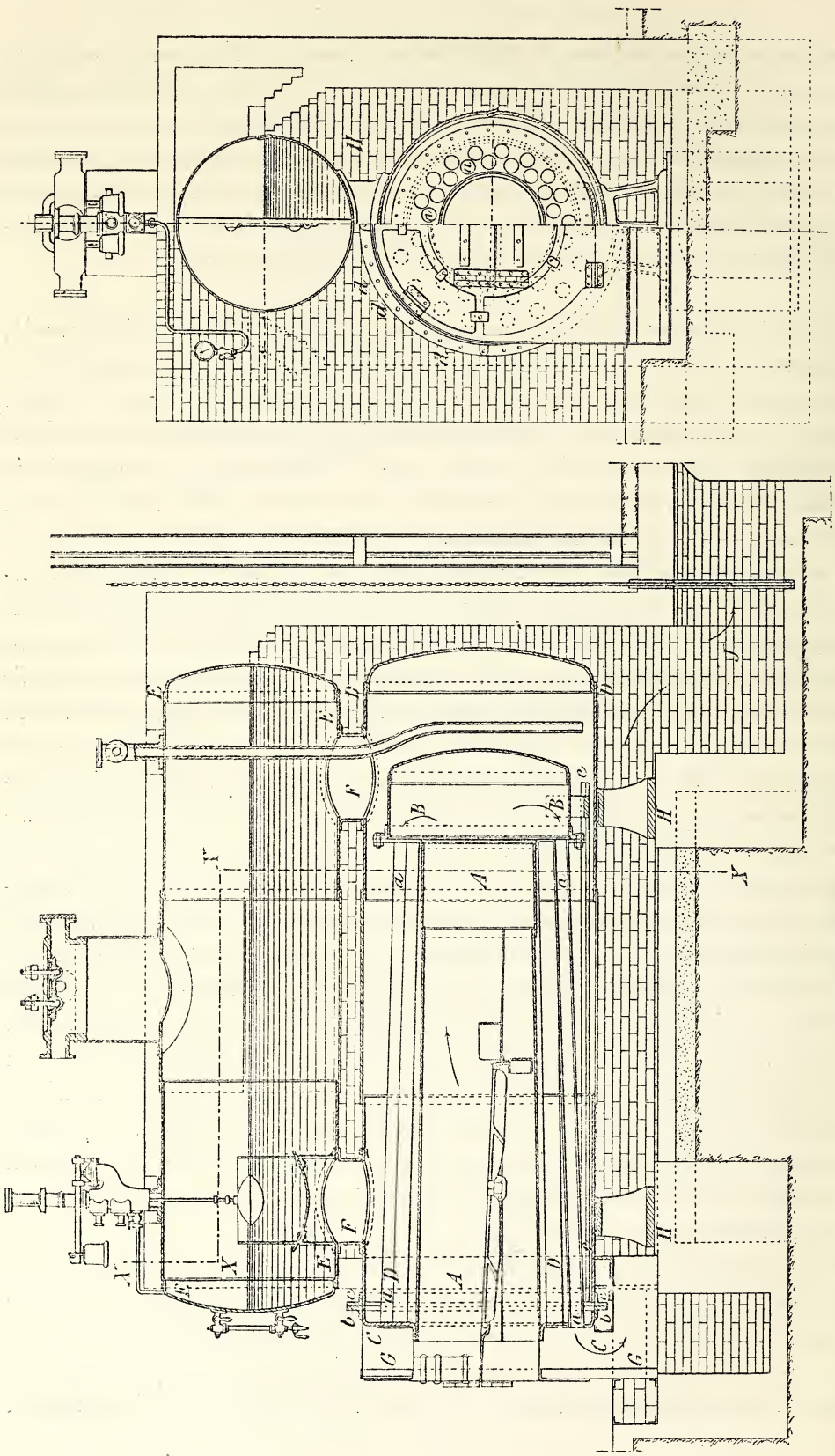
La Société centrale de construction de machines, de Pantin (Weyher et Richemond), avait obtenu, en 1878, un grand prix pour sa belle exposition, qui comportait plusieurs chaudières du système en question. En 1889, cette maison était hors concours, plusieurs de ses administrateurs faisant partie du jury du groupe VI. Elle présentait deux chaudières à foyer amovible, occupant, avec la chaudière de la Compagnie de Fives-Lille, un kiosque élevé dans la cour de la force motrice; elles fournissaient la vapeur à une partie du palais des Machines.

Le foyer intérieur *AA* (fig. 10) est tronconique; il se termine à l'arrière en un cul-de-sac *BB*, d'où partent, en retour, une série de tubes calorifères *aa*, venant aboutir à la plaque d'avant *CC*, à laquelle est également assemblé le tube-foyer. Le tout est entouré concentriquement d'une calandre cylindrique *DD*; au-dessus est un réservoir d'eau et de vapeur *EE*, communiquant avec la calandre par deux larges cuissards *FF*. La plaque d'avant *CC*, épaisse et relevée en collerette sur son bord, porte une forte cornière circulaire *bb*, qui vient en regard d'une autre cornière pareille *cc*; c'est entre ces deux cornières que se fait le joint, au moyen d'une grande bague en caoutchouc et d'un grand nombre de boulons *ddd*.

Pour démonter l'appareil, on défait ces boulons, et le calorifère tout entier, composé du tube-foyer, du cul-de-sac et des tubes calorifères, le tout assemblé sur la plaque d'avant, peut être retiré sans difficulté; cette opération est facilitée par une paire de rails *ee*, sur lesquels glisse un patin fixé dans le bas du cul-de-sac. La bague en caoutchouc, n'étant pas exposée à l'action directe de la chaleur, se conserve fort longtemps sans détérioration notable. Les gaz de la combustion, après avoir parcouru le foyer et les tubes, redescendent par un carneau en tôle légère *GG*, qui entoure les portes du foyer et du cendrier, et se rendent dans une grande chambre en brique *HH*, qui enveloppe complètement le générateur, avant de s'échapper en *J* par le rampant qui le conduit à la cheminée. Des portes en tôle ménagées à l'avant du carneau circulaire permettent le ramonage des tubes.

Toute cette construction est parfaitement entendue, aussi bien comme agencement général que comme détails d'exécution; elle est digne, en un mot, de l'importante maison qui a su se faire une si belle place dans l'industrie de la mécanique.

Dans le même pavillon que les deux chaudières de la Société de Pantin se trouvait



Vue de face. — Coupe suivant XX.

Coupe longitudinale.

Fig. 10. — Générateur de vapeur à foyer amovible construit par la Société centrale de construction de machines.

un générateur établi par la Compagnie de Fives-Lille (Nord); il fournissait également la vapeur à une partie du palais des Machines. Ce générateur est constitué comme il suit (fig. 11) :

Le foyer intérieur *AA* s'assemble, à un bout, sur la plaque avant *BB*, et, à l'autre bout, sur une plaque de fond *CC*, d'où part un faisceau tubulaire, faisant suite au foyer proprement dit; ces tubes s'engagent dans les logements ménagés dans la plaque tubulaire d'arrière *DD*; celle-ci forme le fond du corps cylindrique *BD*, lequel enveloppe complètement le foyer et les tubes. Au-dessus du corps cylindrique est disposé un réservoir d'eau et de vapeur horizontal *EE*, dont les communications sont assurées par trois cuissards *FFF*.

La plaque tubulaire intermédiaire *CC* est réunie à celle d'arrière *DD* par trois forts tirants *aaa*, dont les écrous serrent une contre-plaque *bb*. La plaque d'avant *BB*, rivée sur le tube-foyer, s'assemble sur les corps cylindriques à l'aide des cornières cintrées *cc* et *dd*, serrées par un grand nombre de boulons. Pour retirer le foyer, on démonte ces boulons ainsi que les écrous qui serrent les contre-plaques *bb*, puis on dégage les tubes de la plaque tubulaire d'arrière *DD*; le système peut alors être ramené en avant, hors de sa calandre; des rails aident à cette opération.

Quelques particularités de ce générateur sont intéressantes à signaler. Les fumées, au sortir des tubes et avant de gagner les cheminées, se répandent dans une grande chambre qui enveloppe de toute part l'appareil et le protège contre le refroidissement. On remarquera le dessin des assemblages du tube-foyer et de la plaque d'avant *BB*; ces formes arrondies donnent à l'ensemble une élasticité qui est indispensable pour assurer la dilatation des tubes et le partage des tirants. La prise de vapeur est du type Crampton, et constituée par un long tube percé de trous et débouchant dans le dôme de vapeur.

Les dimensions principales de ce générateur sont les suivantes :

Tube-foyer	Longueur	2^{m} 830
	Diamètre intérieur	1 060
Corps cylindrique	Longueur	6 368
	Diamètre intérieur	1 300
Réservoir	Longueur	6 305
	Diamètre intérieur	0 800
Tubes	Longueur entre plaques	3 500
	Diamètre intérieur	0 070
	Nombre	73
Surface de chauffe		92^{mq}80
Timbre		9^{k} 000

Avant d'aborder l'étude des chaudières à petits éléments proprement dites, nous allons décrire quelques chaudières de genre mixte, c'est-à-dire comportant à la fois, d'une part, des tubes pleins d'eau et baignés par les flammes, et, d'autre part, des

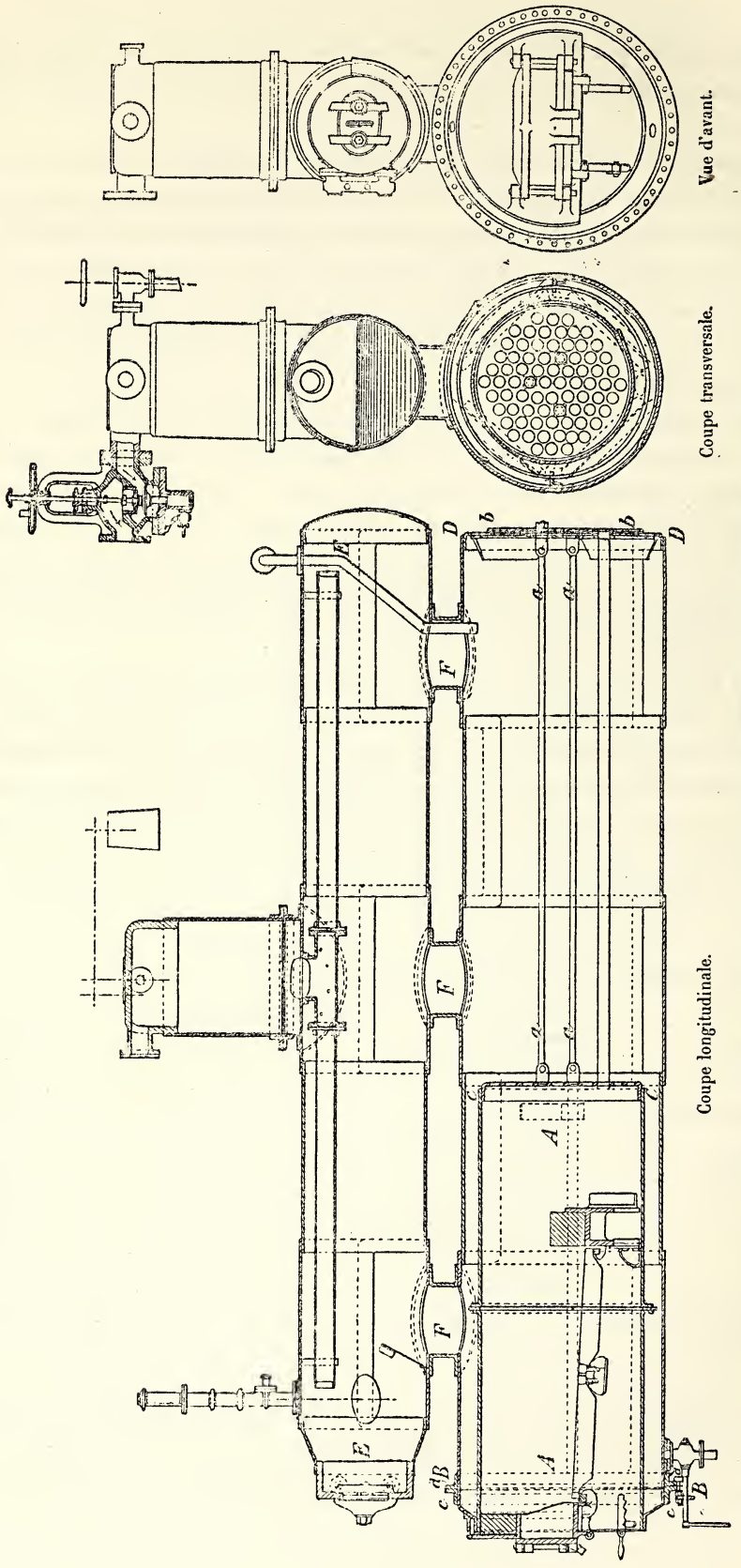


Fig. 11. — Générateur tubulaire à foyer amovible, construit par la Compagnie de Fives-Lille.

corps de chaudière de grande dimension; ces générateurs participent donc à la fois du genre à grand volume d'eau et du genre à petits éléments.

Le type le plus répandu de ce système est la chaudière *Field,* dont le croquis ci-joint (fig. 12) représente les coupes horizontale et verticale. Il se compose d'un foyer intérieur *AA*, en forme de cylindre, ouvert dans le bas, où se trouve la grille, et terminé dans le haut par un ciel plat *BB*, et d'une calandre *CC*, formant lame d'eau autour du

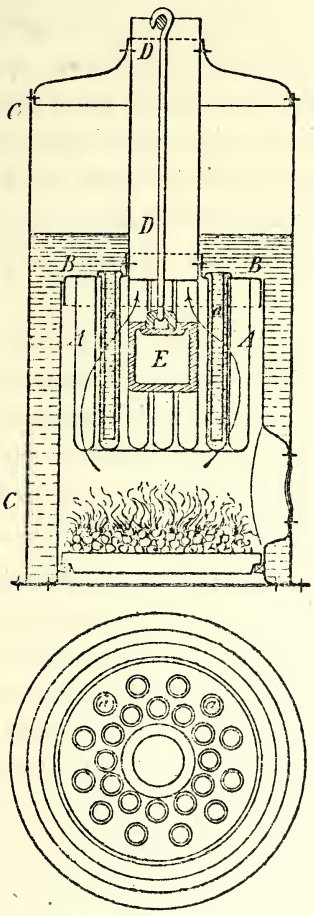


Fig. 12. — Chaudière Field (Imbert frères).

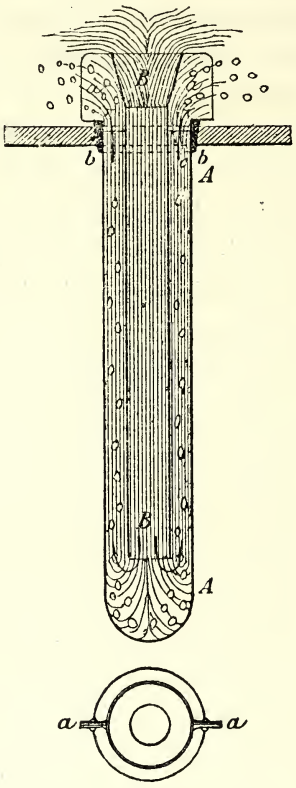


Fig. 13. — Tube Field.

foyer; les flammes s'échappent par une cheminée centrale *DD*, formant entretoise entre le dôme de la calandre et le ciel du foyer. Tout autour de la cheminée et suspendus au ciel plat, sont disposés des tubes *aaa*, fermés par le bas et s'ouvrant par le haut dans l'eau de la chaudière. Ces tubes constituent la partie active et en même temps l'élément caractéristique de l'appareil. Les tubes pendentifs de cette nature, étant le siège d'une vaporisation active, seraient fort exposés à être rapidement encombrés par les dépôts abandonnés par l'eau d'alimentation. Le procédé employé pour éviter ce grave inconvénient est fort ingénieux. A l'intérieur du tube bouilleur *AA* (fig. 13), on suspend un

tube léger *BB*, concentrique au premier, s'ouvrant par le haut dans l'eau de la chaudière et par le bas à une petite distance du fond du tube *AA*. Sous l'action de la chaleur, la vapeur se dégage sur les parois de *AA*, l'intervalle annulaire entre les deux tubes se remplit d'un mélange d'eau et de vapeur, de densité moindre que le liquide qui se trouve à l'intérieur du tube central; il se forme donc, par siphonnement, un courant, descendant par le tube central, ascendant par l'intervalle annulaire, et ce courant est assez rapide pour empêcher les précipités de se déposer dans le tube bouilleur.

Quelques détails d'agencement sont à remarquer. Le tube central est en laiton mince; il se termine dans le haut par un entonnoir évasé portant deux ailettes *aa*, qui reposent simplement sur les bords du trou. Le tube bouilleur, en fer forgé, porte dans le haut une bague conique *bb*, s'adaptant dans le trou du ciel du foyer; le joint cru ainsi formé est bien étanche et amélioré encore par la pression de la vapeur. Le démontage est très facile : pour retirer un tube, il suffit de le pousser vers le haut, en s'aidant de quelques coups de marteau appliqués sur la calotte inférieure. La mise en place d'un tube se fait avec la même facilité.

Chacun des tubes bouilleurs est muni de son tube central (fig. 12). Tous ces tubes pendent dans la flamme : un écran *E* en terre réfractaire oblige les flammes à s'écarter et à lécher toute la surface de chauffe, avant de se rendre dans la cheminée. Les sels précipités viennent former leurs dépôts dans le bas de la lame d'eau qui enveloppe le foyer; à l'aide d'un robinet de vidange fixé au bas de la chaudière, on peut extraire cette eau chargée de boues; ces purges, pratiquées périodiquement et à des intervalles suffisamment courts, permettent de maintenir un état de propreté satisfaisant.

La chaudière Field, si simple, si pratique, a eu beaucoup de succès et reçu de nombreuses applications; il est bien remarquable que ce dispositif ait été proposé, dans ses lignes essentielles, il y a plus d'un siècle. En 1788, Nathan Read imagina une chaudière verticale comportant, comme le type que nous étudions, un foyer intérieur avec double enveloppe comprenant une lame d'eau, et des tubes pendentifs s'attachant au ciel du foyer et s'ouvrant dans l'eau de la chaudière. Comme principe, la similitude est complète. Il restait, pour que le système fût accepté dans la pratique, à l'améliorer, à écarter certains inconvénients, à assurer les détails de sa construction : or près de quatre-vingts ans séparent l'œuvre de Nathan Read de celle de Field.

La chaudière Field est exécutée aujourd'hui par plusieurs maisons. Parmi celles qui en présentaient à l'Exposition, citons en particulier MM. Imbert frères, de Saint-Chamond (Loire), qui se sont fait une spécialité de ce genre de construction et y appliquent leurs procédés de soudage des tôles.

Les principes qui servent de base au fonctionnement de ce système ont été retournés de mille façons. Nous citerons, entre autres, une chaudière remarquable construite par M. L. Dulac, de Paris, un chercheur persévérant et habile, qui s'est attaché avec succès à la solution des problèmes relatifs à la fabrication de la vapeur. Cette chaudière est

représentée en coupe par la figure 14 ci-après. Elle fournissait la vapeur à une partie du palais des Machines. La partie active du vaporisateur *AA* est constituée par un grand nombre de tubes Field, attachés à un fond de chaudière verticale en tôle, emboutie en forme de calotte sphérique, de telle sorte que les tubes, normaux à cette paroi, s'ouvrent en éventail. Ce corps de chaudière vertical *BB* se raccorde à un corps horizontal *CC*, et ce dernier s'assemble lui-même à un second corps vertical *DD*. Le but que M. Dulac s'est proposé dans cette construction s'expliquera clairement par l'examen des trajets suivis par l'eau et les gaz chauds.

L'eau entre en *a* dans la chaudière, par un clapet de retenue monté sur le bas du corps vertical *DD*, lequel est baigné par les gaz encore chauds de la combustion; elle s'élève presque sans vitesse, en s'échauffant progressivement; ce corps vertical fonctionne donc comme réchauffeur. L'eau parcourt ensuite le corps horizontal, où elle atteint la température de la vapeur, et se rend enfin dans les tubes bouilleurs.

La combustion est obtenue à l'aide d'un foyer de forme spéciale, sur lequel nous aurons à revenir. Les flammes enveloppent les tubes bouilleurs, et les gaz chauds, dirigés par les écrans *aa* et *bb*, viennent entourer le corps vertical *AA*, puis lèchent le corps cylindrique *BB*; la large buse *cc* les dirige au contact du réchauffeur.

La vapeur dégagée des tubes bouilleurs s'assèche en contournant l'écran *ee* et vient, en traversant le corps horizontal, se réunir dans le corps *DD*, qui forme un large dôme de prise de vapeur. L'air, avant d'arriver à la grille, s'échauffe au contact des parois réfractaires qui enveloppent le foyer.

M. Dulac a fait de nombreuses recherches sur les procédés à employer pour combattre les incrustations dans les générateurs. L'un des procédés qu'il a imaginés est appliqué dans l'appareil que nous décrivons. Chacun des tubes Field est coiffé d'une sorte de fourreau *dd*, entourant le prolongement du tube central; le calme complet qui règne dans ces fourreaux assure le dépôt des matières en suspension précipitées par la chaleur; d'ailleurs, l'eau d'alimentation éprouve une première épuration dans le réchauffeur, dont la partie basse ne tarde pas à se couvrir de boues, qu'il est facile d'éliminer par des extractions périodiques.

Les dimensions principales de l'appareil que nous venons de décrire sont les suivantes :

Corps vaporisateur	Diamètre	$1^{m}560$
	Hauteur (non compris les tubes)	2 600
Corps horizontal	Diamètre	1 100
	Longueur	3 150
Réchauffeur	Diamètre	1 400
	Hauteur	4 400
Longueur totale de la chaudière		6 140
Tubes	Nombre	199
	Diamètre extérieur	$0^{m}070$
	Longueur	0 145
Timbre		$6^{k}000$
Surface de chauffe		86^{mq}

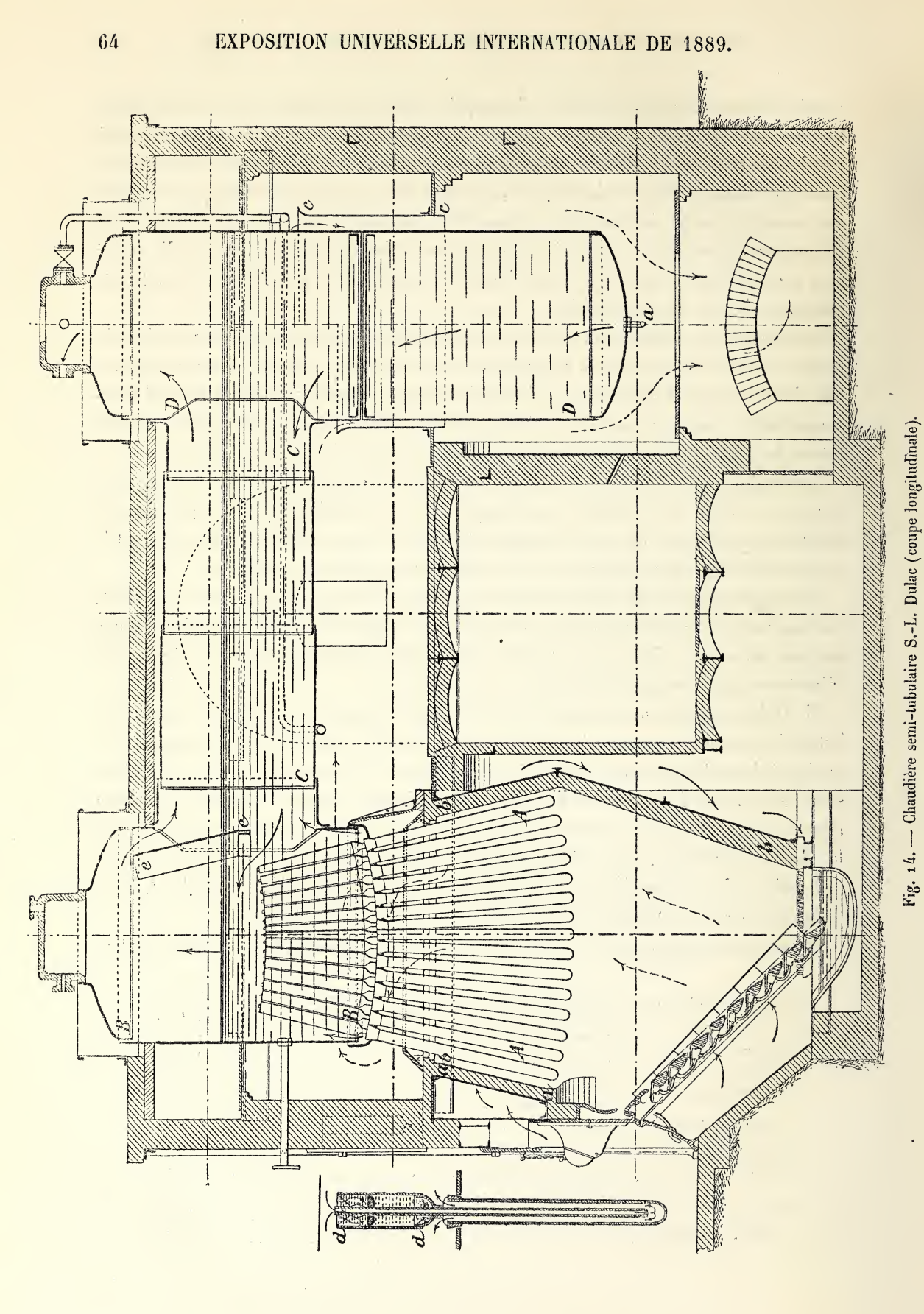


Fig. 14. — Chaudière semi-tubulaire S.-L. Dulac (coupe longitudinale).

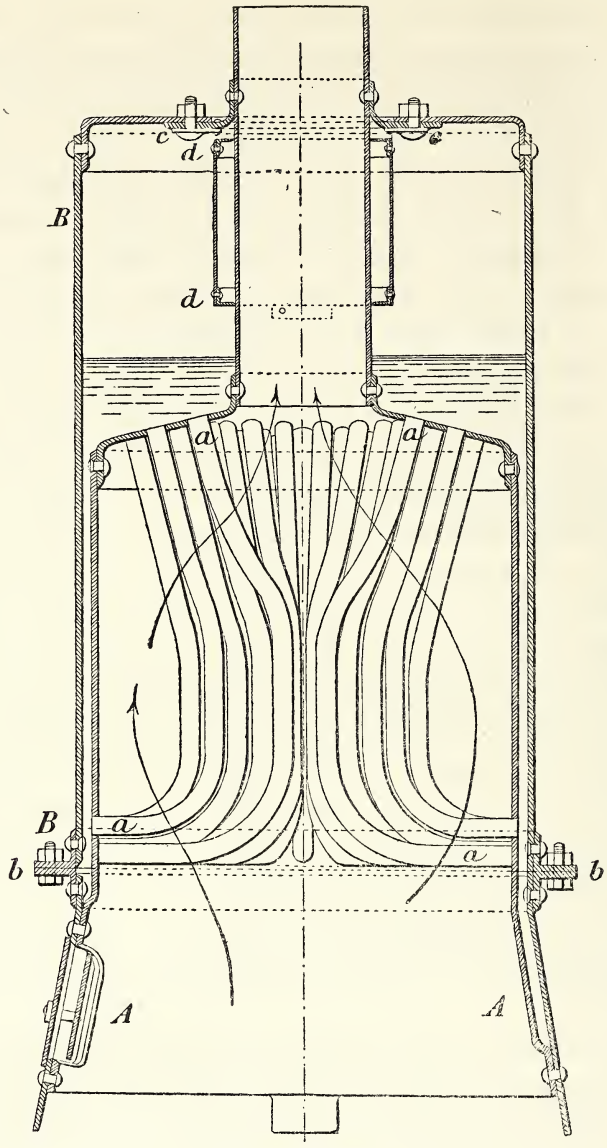
M. Durenne, constructeur à Courbevoie (Seine), présente une petite chaudière à tubes bouilleurs, dérivée du type Field; un spécimen de cette chaudière était installé dans le palais des Machines; un autre était en service dans la station du Syndicat international des électriciens. Ce système de chaudière a été combiné spécialement en vue de desservir les pompes à incendie à vapeur. On sait de quelle importance capitale, en matière d'incendie, est la prompte arrivée des secours; quelques minutes perdues suffisent souvent pour transformer en désastre l'incident le plus insignifiant au début; on connaît les précautions ingénieuses qui ont été imaginées pour que les secours arrivent dès que le sinistre est signalé. Mais toutes ces dispositions, si heureusement combinées, deviendraient inutiles si la pompe, au moment où elle arrive sur place, n'était pas en état de fonctionner immédiatement. Il est donc indispensable que la montée en pression s'obtienne avec une extrême rapidité et que l'eau de la chaudière, maintenue d'ailleurs constamment tiède quand l'appareil est sous la remise, atteigne la température de marche dans les quelques instants qui séparent l'appel de l'arrivée sur les lieux.

Pour satisfaire à ces sujétions, il est nécessaire que la chaudière ait un grand foyer, un petit volume d'eau et un tirage actif. Le tirage s'obtient par un souffleur lançant la vapeur dans la cheminée. Les deux autres conditions peuvent être remplies, soit par une chaudière à petits éléments, soit par une chaudière Field. C'est à ce dernier type que M. Durenne s'est adressé, en le modifiant pour l'adapter aux exigences de ce difficile service. Comme la chaudière Field, la chaudière que nous étudions (fig. 15) comporte un foyer intérieur *AA*, entouré d'eau, et une enveloppe extérieure *BB*. Les tubes *aa* à circulation, au lieu d'être pendentifs, s'ouvrent par le haut et par le bas dans l'eau de la chaudière; ils sont en cuivre rouge étiré et ont reçu une courbure qui a une double fonction : d'une part faciliter les dilatations, d'autre part former des chicanes, qui obligent les flammes à les lécher deux fois dans le parcours de la grille à la cheminée.

Cette chaudière comporte quelques détails intéressants. L'enveloppe extérieure s'assemble, dans le bas, sur la double cornière *bb*, dans le haut, sur la collerette *cc*, au moyen de joints dressés et de boulons; il suffit d'enlever ces boulons pour pouvoir retirer l'enveloppe, ce qui permet le nettoyage complet du foyer; les deux ouvertures des tubes étant alors à découvert, on peut les nettoyer facilement à l'aide d'un écouvillon à manche flexible. La vapeur pénètre par de petits trous dans le manchon *dd*, assemblé sur la base de la cheminée, se sèche au contact de la tôle chaude; c'est sur ce manchon que se fait la prise de vapeur.

Le foyer est en tôle de fer soudée; l'enveloppe est en tôle d'acier soudée.

IMPRIMERIE NATIONALE.

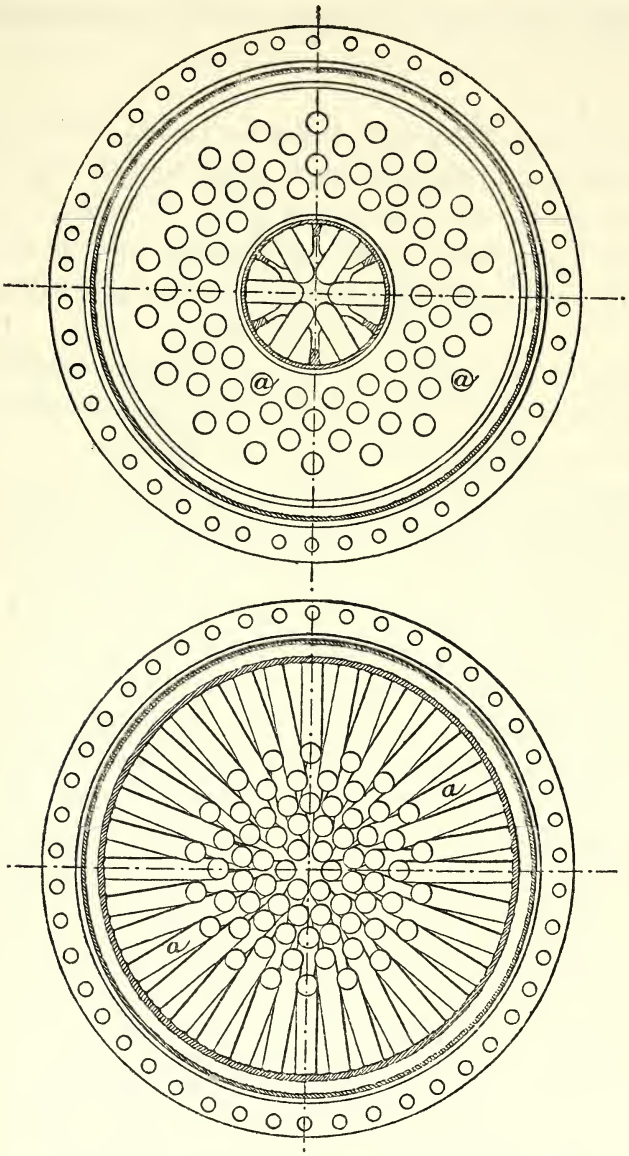


Coupe verticale.

Fig. 15. — Chaudière Durenne.

Les dimensions principales de l'appareil qui a fonctionné à l'Exposition sont données dans le tableau ci-après :

Diamètre extérieur de l'enveloppe	1^m 145
Diamètre du foyer	0 965
Hauteur du foyer	2 100
Hauteur de la chaudière	2 950
Tubes. — Diamètre intérieur	0 030
Nombre de tubes	192



Coupes horizontales.

Fig. 15 *bis*. — Chaudière Durenne.

Surface de grille	1^{mq} 35
Surface de chauffe	30 00
Volume d'eau	850 litres.
Poids de la chaudière	3,270 kilogr.
Soit par mètre carré de surface de chauffe	109 kilogr.

La production avec tirage forcé peut atteindre 1,200 à 1,500 kilogrammes de vapeur à l'heure.

Le modèle adopté par le corps des pompiers de Paris est beaucoup plus petit et plus léger.

MM. de Dion, Bouton et Trépardoux, de Puteaux (Seine), se sont proposé d'établir une chaudière réunissant, au plus haut degré, la puissance et la légèreté. Les premiers essais ont eu pour objet la mise en mouvement des vélocipèdes; le système a ensuite été appliqué, mais à plus grande échelle, aux yachts et canots de course à vapeur. Le croquis ci-joint (fig. 16) représente la chaudière dont il s'agit, telle qu'on la construit actuellement.

Elle est verticale et cylindrique et se compose de quatre éléments principaux : le foyer *AA*, le bouilleur central *B*, les tubes *aa* et l'enveloppe ou calandre *CC*. Le foyer et l'enveloppe sont deux cylindres concentriques, entre lesquels se trouve une lame d'eau; le bouilleur central est également un cylindre, concentrique aux premiers, et communiquant avec la lame d'eau annulaire par une série de tubes en forme de hérisson; le système est coiffé d'un capuchon en tôle légère surmonté par la cheminée.

Le bouilleur central est divisé en deux parties par une cloison horizontale *bb* placée au-dessus du niveau de l'eau et en dessous de la rangée supérieure de tubes; il résulte de cette disposition que la vapeur qui se forme dans le bouilleur et celle qui y est déversée par les tubes passent successivement par les deux rangées supérieures de tubes, lesquels sont chauffés par les gaz du foyer, et s'y dessèchent avant d'arriver dans le compartiment supérieur du bouilleur central, qui les délivre à la prise de vapeur. Deux grands joints boulonnés *cc* et *dd*, constitués par une mince feuille d'amiante serrée entre des bagues et cornières ajustées, permettent de démonter l'enveloppe extérieure pour visiter le foyer et les tubes bouilleurs. Nous tirons des renseignements fournis par les inventeurs les indications ci-après, sur une de leurs chaudières :

Surface de chauffe	5^{mq} 75
Surface de grille	26^{dmq} 42
Timbre	10 kilogr.
Poids d'eau	90 kilogr.
Poids de la chaudière en service	717 kilogr.
Dimensions en plan	$0^m750 \times 0^m750$
Hauteur	1^m560
Vaporisation par heure avec tirage forcé	440 kilogr.

Ce qui conduit à un poids de chaudière de 1 kilogr. 6 par kilogramme de vapeur produite en une heure, résultat assurément remarquable. Le poids par mètre carré de surface de chauffe est de 124 kilogrammes.

Nous arrivons à l'une des questions les plus intéressantes de l'exposition de la mécanique générale : celle des générateurs à petits éléments. Assez peu usitées il n'y a pas bien longtemps, les chaudières de ce genre ont pris, depuis quelques années, une très

rapide extension; elles constituent, en la matière, une des notes les plus caractéristiques de l'Exposition. En 1878, une seule batterie de ces chaudières était en feu; en 1889,

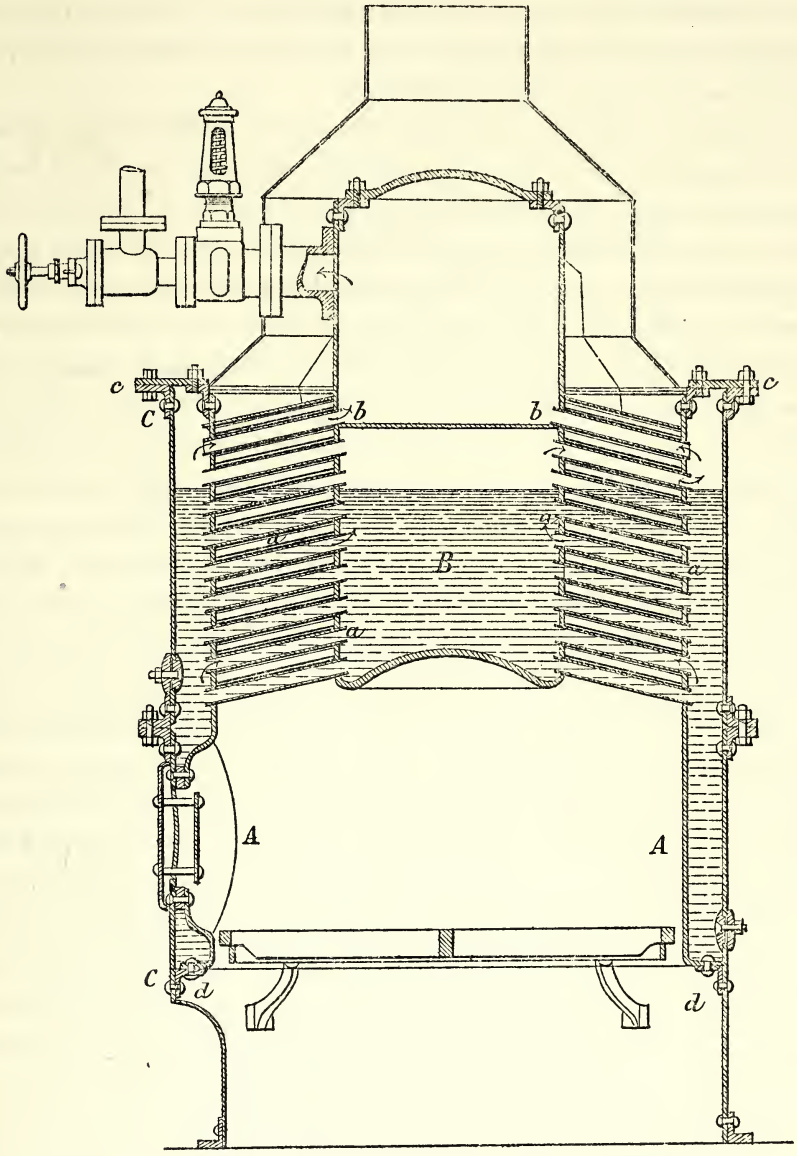


Fig. 16. — Chaudière de Dion, Bouton et Trépardoux.

une douzaine au moins de maisons présentaient de ces chaudières, qui fournissaient la presque totalité de la vapeur consommée, tant au Champ de Mars qu'aux Invalides.

On désigne ces appareils sous différents noms : on les appelle *chaudières multitubulaires,* terme fort impropre; *inexplosibles,* désignation inexacte; ou bien *à multiples éléments, à petits tubes bouilleurs,* etc.; la dénomination de *petits éléments* se trouve dans

quelques documents officiels; elle est suffisamment expressive, et nous l'adopterons de préférence.

Ce qui caractérise ce genre de chaudières, c'est que l'eau, au lieu d'être, comme dans les autres chaudières tubulaires, à l'extérieur des tubes, se trouve au contraire à l'intérieur; un pareil générateur se compose d'un faisceau de tubes remplis d'eau et plongés dans la flamme et les gaz de la combustion.

L'idée de ce dispositif est fort ancienne; dès que le besoin s'est fait sentir de produire la vapeur dans des appareils très légers, on a naturellement pensé à se servir de tubes de petit diamètre, par conséquent à parois minces, pesant peu et contenant peu d'eau. Les auteurs qui ont écrit l'histoire de la machine à vapeur citent plusieurs types de chaudières à petits éléments, proposés ou construits il y a plus d'un siècle. Mais ces tentatives n'eurent pas de suite : il fallait une industrie plus avancée, d'une part, pour rendre réellement utile l'emploi de ces appareils délicats, d'autre part, pour permettre de les exécuter avec assez de perfection pour qu'ils fussent d'un usage pratique et sans danger. L'homme qui a le plus contribué à acclimater ces chaudières, c'est M. Belleville. Son premier brevet date de 1850. Mais il s'écoula de longues années avant qu'il fût possible de confier à des chauffeurs une chaudière à petits éléments qui répondît convenablement aux exigences d'un service courant. Ces années, M. Belleville les consacra, avec une persévérance infatigable, à perfectionner l'idée primitive, à imaginer et expérimenter des dispositifs et des matériaux, des procédés d'assemblage, des appareils et accessoires. Ces tâtonnements pénibles et coûteux durèrent plus de vingt-cinq années, car ne n'est guère que vers 1878 que la chaudière Belleville prit définitivement sa place et son assiette. Pendant ce temps, poussés par les mêmes besoins, des constructeurs américains, MM. Babcock et Wilcox, s'efforçaient de résoudre le même problème. Leur premier brevet date de 1856. Ainsi, des deux côtés de l'Atlantique, les mêmes recherches se poursuivaient parallèlement avec la même ardeur, la même dépense d'invention et de génie mécanique. Les deux maisons rivales arrivèrent au but presque en même temps, par des moyens analogues sans doute en principe, mais fort différents en somme quant aux formes et dispositions des appareils. Dans ces dernières années, et en présence des résultats obtenus, un grand nombre d'inventeurs se sont lancés dans la voie nouvelle, et les systèmes de chaudières à petits éléments se sont multipliés, les uns bons, les autres médiocres ou mauvais. C'est l'histoire du premier essor de toute invention importante. Rappelons d'abord les principes essentiels qui sont les bases de tous ces systèmes.

Ainsi que nous l'avons déjà observé, l'idée primitive qui a présidé à la conception de ces sortes de chaudières, c'est la sécurité qu'elles semblent présenter par le fait même de leur construction; elles ne contiennent qu'une quantité restreinte de matière explosive, c'est-à-dire d'eau chaude, et par suite les fortes projections dynamiques ne sont plus à craindre.

A un autre point de vue également, la sécurité semble assurée : lorsqu'un gros corps

de chaudière vient à se rompre, le plus souvent la rupture a lieu sur une large étendue; de sorte que les effets dynamiques résultant de la détente de l'eau chaude se produisent en un instant très court et, par conséquent, avec une extrême violence. Si, au contraire, l'eau est renfermée dans des tubes de petit diamètre, la rupture d'un de ces tubes ne peut avoir les mêmes effets désastreux; la section offerte aux fluides sous pression étant restreinte, l'écoulement se fait avec une certaine lenteur; la matière explosive fuse et n'éclate pas, les phénomènes ne sont plus instantanés et perdent leur caractère de violence.

A ces deux points de vue, faible quantité de matière explosive, lenteur relative des effets produits, les chaudières à petits éléments, lorsqu'elles sont convenablement installées, peuvent être regardées comme inoffensives pour le voisinage. Ce n'est pas à dire pour cela que le personnel des chauffeurs jouisse de la même immunité : les chaudières à petits éléments ne sont pas plus que tout autre système à l'abri des accidents; elles ne justifient en aucune façon la qualification d'*inexplosibles* qu'on leur a parfois donnée; mais les effets de ces accidents ne s'exercent que dans un cercle restreint. Cette considération a permis d'adoucir ou de modifier, dans un grand nombre de cas, les prescriptions rigoureuses imposées par les règlements de police aux générateurs installés dans le voisinage de locaux habités; c'est là une des causes les plus décisives qui ont amené l'extension si rapide qu'ont prise depuis quelques années les chaudières à petits éléments, surtout dans les villes et en particulier pour les installations électriques.

Ce système de générateur s'impose chaque fois que la sécurité du voisinage est la question prédominante; mais ce ne sont pas les seuls cas où ces appareils ont été employés; la sécurité mise à part, ils possèdent certaines propriétés importantes, qui les ont recommandés pour des applications variées.

La première de ces propriétés, c'est le faible encombrement : une chaudière Belleville, par exemple, n'occupe pas une place beaucoup plus grande que le plan de sa grille; propriété précieuse dans tous les cas où le terrain est cher et les emplacements disponibles restreints; c'est un des motifs qui ont fait adopter ces chaudières sur plusieurs des grands navires de l'État ou du commerce. A cette question de l'encombrement se relie immédiatement celle de la puissance; dans une chaudière à tubes bouilleurs, les passages offerts à l'écoulement des gaz de la combustion sont très larges; ils ne sont nullement étranglés, comme, par exemple, dans le type locomotive; il semblerait donc théoriquement que la puissance de combustion par mètre carré de grille puisse être poussée très loin. En pratique, il n'en est pas tout à fait ainsi; les chaudières que nous étudions se trouvent mal d'une combustion trop intense; l'expérience a conduit les constructeurs à demander l'augmentation de puissance moins à l'activité de la combustion qu'à l'accroissement des dimensions de la grille. C'est un sujet intéressant, sur lequel nous nous réservons de revenir.

Le volume d'eau que contiennent ces chaudières est très petit et le poids du métal

relativement faible; la montée en pression est donc fort rapide. C'est un avantage capital dans un grand nombre de cas; citons quelques exemples : installations fixes ou mobiles, dans lesquelles la durée du travail journalier est très courte, canots à vapeur, etc. Le faible poids des chaudières en question permet de les amener même dans des localités d'un accès fort difficile, et souvent cet avantage est loin d'être à dédaigner; ajoutons que plusieurs constructeurs se sont attachés à diviser leurs appareils en éléments de poids très modéré, propres à être transportés à dos de mulet ou à dos d'homme; ces éléments sont agencés de manière à pouvoir s'assembler très facilement; par de pareils artifices, auxquels les chaudières à grand volume ne se prêteraient nullement, les lieux presque inaccessibles peuvent être pourvus de force motrice.

Les chaudières à petits éléments se vendent assez cher; mais si l'on tient compte du prix du fourneau, du terrain occupé, des bâtiments, on verra qu'en définitive, dans la plupart des cas, les dépenses d'installation d'une pareille chaudière à égalité de puissance ne sont pas supérieures à celles de tout autre système; elles leur deviennent même notablement inférieures chaque fois que le terrain est d'un prix élevé.

Pour terminer la nomenclature des qualités des chaudières à petits éléments, rappelons qu'au point de vue de la bonne utilisation du combustible, elles ne le cèdent en rien aux meilleurs types de générateurs. Nous aurons ainsi expliqué les progrès rapides que fait cette nouvelle industrie et l'extension qu'elle a prise.

Mais il faut voir aussi le revers de la médaille. Ce n'est pas aveuglément et dans tous les cas qu'il convient de substituer les chaudières nouvelles à celles qui depuis longtemps rendent de si bons services à nos industries. La chaudière en question est un outil perfectionné, mais un peu délicat; la construction en doit être soignée et bien entendue; il ne doit pas être brutalisé en service, ni placé en des mains inexpérimentées.

Le volume de l'eau renfermée dans les générateurs à petits éléments est toujours très faible, eu égard à la puissance de l'appareil; le volant de chaleur, constitué, dans les chaudières à grand volume, par la masse des réservoirs d'eau, est réduit ici aux plus minimes proportions; pour peu qu'il n'y ait pas équilibre complet entre la production de vapeur et la consommation, la pression s'élève ou s'abaisse très rapidement. Cette instabilité de la pression exige, de la part du chauffeur, une connaissance bien complète de sa profession et de son appareil, et, dans tous les cas, des soins et une attention constamment en éveil; quelques constructeurs même ont jugé nécessaire de confier ces fonctions difficiles à des appareils automatiques.

La quantité d'eau vaporisée par heure est le plus souvent équivalente à plusieurs fois le volume d'eau contenu dans la chaudière, c'est-à-dire que, pour peu que le chauffeur ne soit pas attentif et cesse pendant quelques minutes de veiller à l'alimentation, le plan d'eau va baisser très rapidement et un accident grave est à craindre. Dans quelques types de chaudières à petits éléments, l'alimentation également est assurée par des appareils automatiques, dont le débit est réglé par la position du plan d'eau.

Les tubes étroits dans lesquels se forme la vapeur ne la laissent pas dégager avec la même facilité que les masses d'eau des chaudières ordinaires; les bulles de vapeur restent mélangées à l'eau et l'entraînent dans leurs mouvements, en formant avec elle une sorte d'émulsion; la décantation a lieu, non pas dans les tubes eux-mêmes, mais dans des collecteurs de plus grand volume, dans lesquels ils débouchent; des entraînements d'eau, très violents et fort dangereux, ont tendance à se produire; il faut des dispositifs particuliers pour éviter ce grave inconvénient.

Les tubes tendent à être obstrués, soit par les dépôts, soit par les corps accidentellement introduits dans l'eau. Le volume d'eau étant petit et la vaporisation rapide, l'eau atteint très promptement l'état de saturation, et les précipités se forment avec abondance; il est nécessaire d'empêcher qu'ils ne s'attachent, sous forme d'incrustation, aux parties de la chaudière qui reçoivent l'action de la chaleur. Quant aux corps en suspension, on a vu des tubes obstrués par des chiffons oubliés dans la chaudière, par des copeaux de bois de campêche, qu'on y avait introduits pour combattre la formation du tartre; en cas d'obstruction des tubes, le coup de feu est imminent.

L'obstruction par les incrustations serait à peu près inévitable, si l'eau restait stagnante dans les tubes exposés à la chaleur. Il est indispensable que cette eau soit animée de mouvements rapides, s'opposant à l'adhérence des précipités. Pour obtenir ce résultat, les constructeurs s'efforcent d'imprimer à l'eau une circulation active et continue, en disposant sur le trajet, en des points convenablement choisis, des réservoirs assez grands pour que la vitesse y soit très faible; ces réservoirs sont préservés de l'action des flammes; l'eau s'y décante, les précipités s'y déposent sous forme de boues, que des purges périodiques permettent d'expulser.

Tous les systèmes de générateurs à petits éléments comportent une circulation pareille, faute de laquelle le fonctionnement deviendrait vite défectueux et dangereux. Elle est toujours obtenue comme un résultat de la production même de la vapeur; les procédés employés diffèrent beaucoup d'une chaudière à l'autre; les moyens mis en œuvre pour assurer le mouvement de l'eau constituent, entre les divers systèmes, des différences fondamentales, et peuvent être pris comme caractéristiques de chaque système. Tantôt la circulation se fait d'un tube à l'autre ou dans une série de tubes superposés; dans d'autres cas, elle est produite par masse dans toute la chaudière, l'eau s'élevant à la fois dans tous les tubes, pour redescendre par une conduite spéciale placée en dehors des flammes. Une chaudière à petits éléments n'est acceptable que lorsque cette fonction capitale est absolument assurée, et qu'il n'y a aucune possibilité que l'eau se cantonne en certains points et y reste immobile, en dehors des réservoirs spéciaux aménagés à cet effet.

Malgré tous les soins que l'on peut prendre, le dégagement de la vapeur dans des tubes étroits est toujours plus ou moins gêné; d'autre part, la moindre obstruction peut amener rapidement un coup de feu. Il faut donc quelque prudence dans la conduite du foyer; les allures à combustion vive ne sont pas sans présenter des inconvénients.

Il va de soi que les mouvements de la vapeur doivent être réglés d'une manière aussi certaine que ceux de l'eau. La formation de chambre de vapeur dans les tubes serait une cause de graves accidents.

Le parcours des gaz chauds fournis par la combustion est assuré de telle sorte, que le courant lèche successivement les différentes parties de la surface de chauffe. Si on laissait les gaz vaguer librement dans la chambre qui entoure le faisceau de tubes, ils suivraient le trajet de plus facile écoulement entre la grille et la cheminée, et l'utilisation de la surface de chauffe serait tout à fait incomplète. C'est au moyen d'écrans convenablement agencés que l'on assure la direction des gaz; et souvent l'installation de ces écrans n'est pas une petite difficulté, eu égard à la nécessité de permettre le ramonage commode de toutes les parties de l'appareil.

Entrons dans quelques détails sur la construction des divers organes de la chaudière.

Les tubes se font en fer; le plus souvent ils sont soudés par recouvrement, et la ligne de soudure est une ligne de moindre résistance; le choix du fournisseur, l'achat et la réception des tubes sont des opérations qui exigent des soins et du discernement. Il n'est pas inutile néanmoins de faire remarquer que, par suite des nécessités de la fabrication, les tubes reçoivent en général une épaisseur beaucoup plus grande que celle qui serait nécessaire pour résister simplement à la pression qu'ils subissent en service; c'est autant de gagné pour la sécurité et pour la solidité de l'appareil.

L'assemblage des tubes avec les parties voisines est un problème difficile, à cause de la multiplicité de ces joints, qui ont déjà donné lieu à de notables accidents. Les procédés les plus en usage sont les suivants :

1° Les joints coniques à cru; le bout du tube, taillé en cône, s'engage à force dans un logement fraisé, soit à la même conicité, soit sous un angle un peu plus ouvert. Ce joint est étanche et solide, mais il manque un peu d'élasticité pour se prêter aux dilatations et aux déplacements relatifs des organes. Le joint n'offrant qu'une faible résistance à la séparation, les parties assemblées sont contre-tenues par des tirants ou ancrages.

2° L'expansion du bout de tube ou *dudgeonnage;* c'est le procédé employé pour assembler les tubes des locomotives; ce joint est fort solide et bien étanche lorsqu'il est bien fait; mais dans certaines parties des générateurs à petits éléments, l'accès de l'outil n'est pas commode et le contrôle de l'opération est difficile; or, pour un pareil joint, tout dépend de l'exécution; aussi les joints dudgeonnés ont-ils donné lieu, dans certains cas, à des mécomptes et même à de sérieux accidents.

3° L'assemblage à vis; il donne une grande sécurité; quelques artifices de construction, et notamment l'emploi d'un contre-écrou, lui procurent une étanchéité parfaite. Le filetage du bout de tube, ainsi que le taraudage de la contre-partie, ont besoin d'être exécutés avec précision; c'est d'ailleurs un travail d'usine, pour lequel on dispose de toutes les ressources nécessaires; les pièces une fois fabriquées, l'assemblage n'offre plus aucune difficulté et peut être exécuté par des ouvriers ordinaires.

Quelles que soient les précautions prises, dans l'agencement général de la chaudière, pour éviter l'incrustation des tubes, il est impossible de compter qu'ils resteront indéfiniment nets de tout dépôt. Il est donc indispensable de se ménager les moyens de les visiter et de les nettoyer. A cet effet, en regard du bout de chaque tube, on dispose une ouverture munie d'un bouchon; c'est par là qu'on introduit les raclettes et hérissons. Ces bouchons ont donné lieu à des accidents. Ils sont fréquemment constitués par une simple plaque, serrée sur son siège par un boulon à vis; si une fuite se produit, le chauffeur est naturellement porté à l'aveugler en serrant davantage l'écrou; il le serre si bien, que le boulon casse; alors le bouchon est projeté par la pression de la vapeur, et le chauffeur est souvent blessé ou brûlé. Les bouchons autoclaves, se fermant du dedans au dehors, ne présentent pas cette cause de danger; mais ils sont moins simples et leur mise en place est moins commode.

La construction des générateurs à petits éléments soulève encore d'autres questions, qui sont plus ou moins résolues, plus ou moins obscures. Mais il faut se souvenir que, sinon l'invention de ces appareils, tout au moins leur entrée dans l'industrie sont relativement récentes; il y a une quinzaine d'années à peine qu'ils se sont répandus dans la pratique. Il n'est pas douteux que le temps fera son office, et que l'usage même de ces chaudières aura pour effet de fixer les principes, de préciser les idées, d'apporter des améliorations notables et une sécurité plus complète encore.

Pour le moment, les notions acquises sur certains points du fonctionnement de ces appareils sont encore vagues et flottantes; cette indécision s'est traduite, comme d'habitude, par l'éclosion d'un grand nombre de dispositifs fort différents, que l'on rencontrait dans les cours et galeries de l'Exposition. A côté de chaudières bien étudiées, bien établies et ayant fait un bon service, se présentaient des ébauches, des projets plus ou moins mûrs de constructions peu ou pas essayées. Il serait bien superflu de décrire toutes ces chaudières. Nous nous en tiendrons à celles que l'on peut considérer comme ayant fait leurs preuves dans la pratique industrielle.

Les générateurs à petits éléments se divisent naturellement en deux classes, suivant l'importance du volume d'eau qu'ils contiennent. Ceux de la première classe comportent, outre les tubes bouilleurs, des réservoirs plus gros, dans lesquels se fait la séparation entre la vapeur et le liquide. Dans les générateurs de la deuxième classe, les gros éléments sont supprimés, ou plutôt ils se réduisent à un collecteur de dimensions restreintes, ne contenant que de la vapeur.

Au point de vue de la sécurité du voisinage, le premier système est moins satisfaisant. Ces gros corps de chaudières, contenant de l'eau chaude en quantité notable, pourraient, en cas de rupture, donner lieu à des projections dynamiques violentes. Il convient toutefois de faire remarquer que ces réservoirs sont, en général, tenus éloignés du foyer, et que, par conséquent, ils échappent à la plupart des causes de détérioration; ils sont, à ce point de vue, analogues à l'enveloppe cylindrique des chaudières de

locomotives, enveloppe qui n'est pas en contact avec les gaz chauds et qui est bien rarement le siège d'accidents graves.

Cette cause de danger est entièrement supprimée avec les générateurs de la seconde classe, lesquels ne contiennent qu'une très petite quantité d'eau, cantonnée exclusivement dans des tubes de faible diamètre. Mais, si le voisinage peut être considéré comme à l'abri de tout accident, les inconvénients que l'on reproche aux générateurs à petits éléments, instabilité de la pression et du plan d'eau, entraînements d'eau, etc., sont portés, dans ces chaudières, à leur maximum d'intensité; l'attention du chauffeur le plus soigneux eût été ici impuissante; et pour assurer un fonctionnement régulier, il a fallu recourir à des appareils automatiques et à d'autres artifices de même ordre.

Nous allons jeter un coup d'œil sur les principaux générateurs à petits éléments qui figuraient à l'Exposition, en commençant par ceux de la première classe, lesquels comportent, outre les faisceaux tubulaires, des réservoirs contenant de l'eau chaude et de la vapeur.

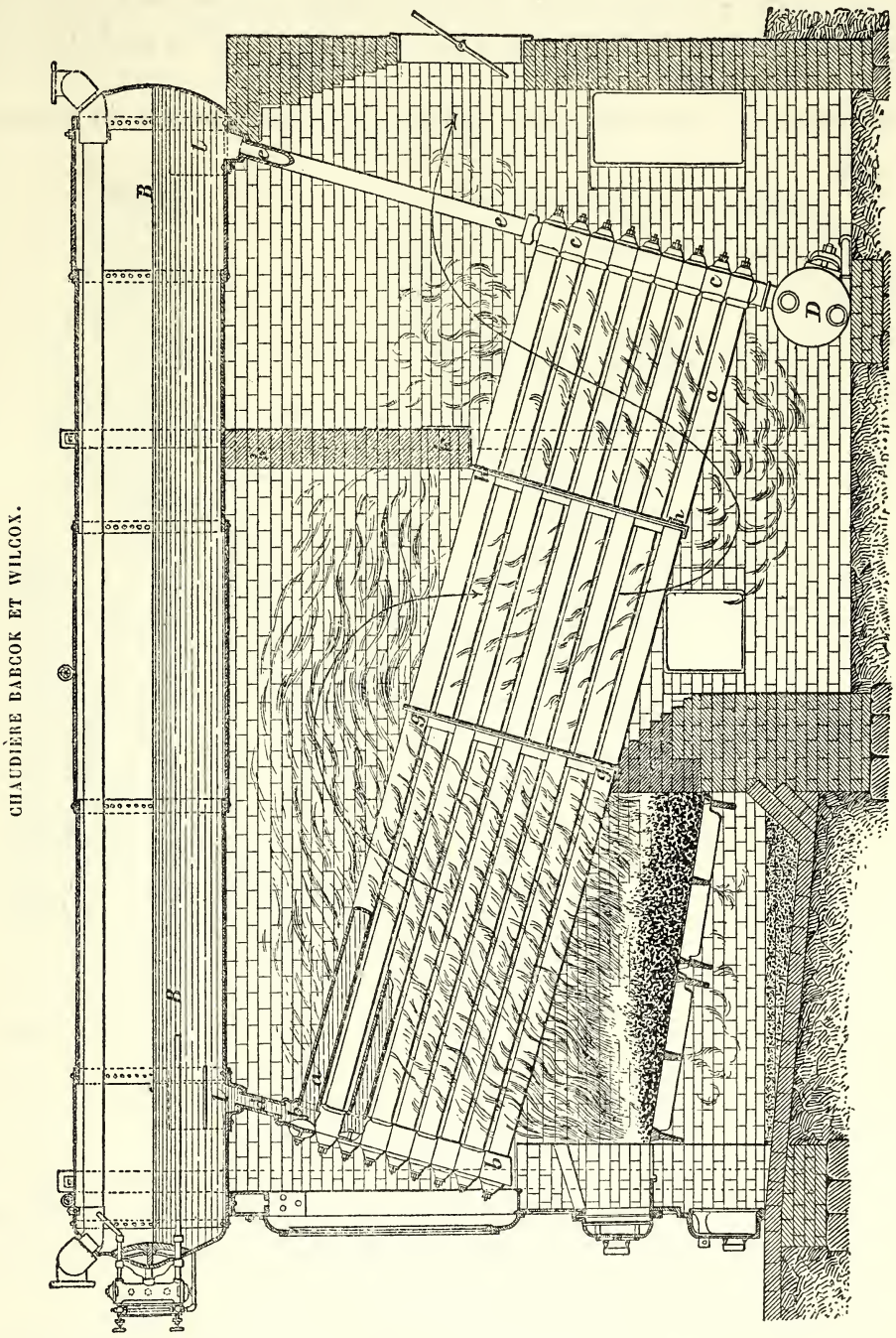
La maison Babcock et Wilcox, une des usines de chaudronnerie les plus importantes du monde entier, a son siège à New-York et des succursales dans les principales villes de l'Europe. Elle présentait à l'Exposition, outre les appareils qui vont être étudiés, une curieuse notice, renfermant des indications du plus haut intérêt sur les origines de la chaudière Babcock et Wilcox, les tâtonnements auxquels elle a donné lieu et les transformations qu'elle a subies avant d'en arriver à sa construction actuelle. On retrouve, dans cette histoire, un grand nombre de formes et de dispositifs qui font aujourd'hui l'objet de brevets et sont repris et essayés à nouveau.

Le type moderne établi par la maison Babcock et Wilcox est représenté par les figures 17 à 21.

Les tubes *aa* sont longs, inclinés, disposés en quinconce. Le faisceau tubulaire est surmonté d'un réservoir *BB*, contenant de l'eau jusqu'à mi-hauteur. Les communications sont établies comme il suit : les tubes superposés dans un même plan vertical sont reliés entre eux à leurs deux bouts par des boîtes *bb* et *cc*, qui sont elles-mêmes surmontées de conduits *dd* et *ee* aboutissant au réservoir supérieur; dès lors, la circulation a lieu de la façon suivante : la vapeur formée dans les tubes se déverse dans les boîtes *bb*, et s'élève, entraînant l'eau dans son mouvement; elle débouche, par les conduites *dd*, dans le réservoir supérieur, où se fait la séparation de l'eau et de la vapeur; l'eau liquide redescend par les conduites *ee* et les boîtes *cc*. La circulation continue est ainsi assurée. Le bas des boîtes *cc* est en communication avec un déjecteur *D*, réservoir dans lequel se déposent les boues, et qui porte un robinet de purge pour les extractions. C'est dans ce collecteur que se fait l'alimentation.

Les gaz dégagés par la grille sont chicanés par les cloisons *gg*, *hh* et *kk*, qui les forcent à venir trois fois en contact avec les tubes avant de s'échapper par la cheminée.

Les boîtes *bb* et *cc* ont reçu une courbure sinueuse, de telle sorte que les tubes forment quinconce, ce qui contrarie le courant de flammes. Dans les derniers modèles, ces



CHAUDIÈRE BABCOK ET WILCOX.

Fig. 17. — Coupe longitudinale.

boîtes se font en fer forgé et sont obtenues à l'aide d'un outillage perfectionné. Il en est de même des larges pièces *l*, *l*, par lesquelles les conduites *d*, *e* communiquent avec le corps cylindrique ; ces pièces sont rivées sur le cylindre *BB*.

L'assemblage des tubes sur leurs boîtes se fait par dudgeonnage. Vis-à-vis chaque bout de tube est un trou de visite, fermé par un bouchon à vis *m*, retenu par une ancre : aujourd'hui on donne à cette ancre la forme d'un plateau, qui, en cas de rupture du boulon, serait appuyé sur l'ouverture par la pression de la vapeur, produisant ainsi une fermeture provisoire.

Le générateur est suspendu à une charpente en fer indépendante du fourneau,

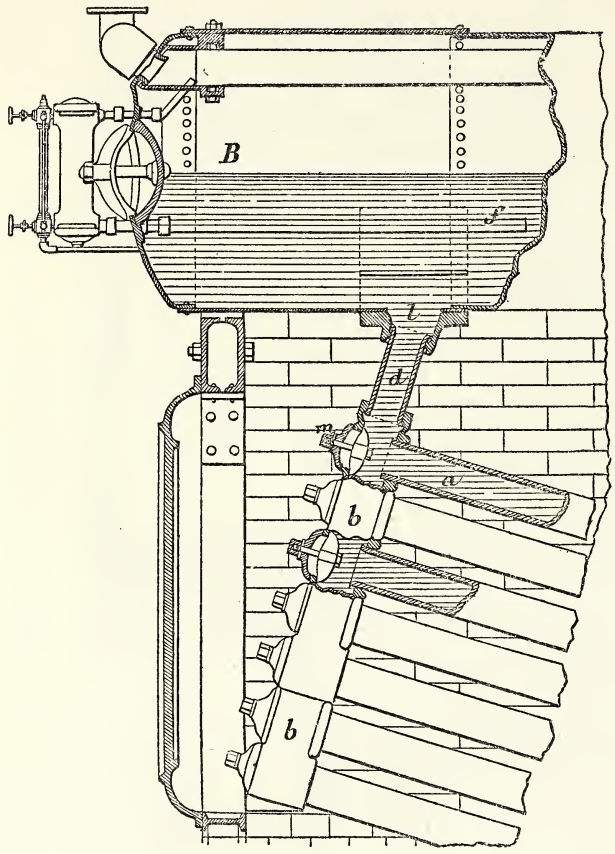


Fig. 18. — Détail.

Fig. 19. — Boîte d'assemblage en fer forgé.

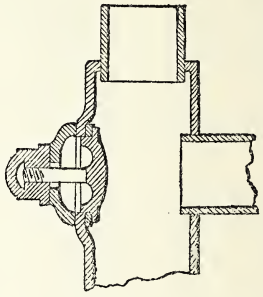


Fig. 20. — Détail d'un bouchon.

lequel n'est formé que d'un remplissage en briques, qui peut être démoli à volonté, sans qu'on ait à toucher à la chaudière proprement dite.

Le nettoyage intérieur des tubes se fait par les ouvertures à bouchon autoclave; à cet effet, la face avant est munie de portes, qui peuvent s'ouvrir en grand, de manière à découvrir les boîtes en fer forgé; malgré leur grande longueur, les tubes étant inclinés et ouverts des deux bouts, le nettoyage est assez facile.

Le ramonage extérieur est moins commode et ne peut guère avoir lieu en marche; on fait pénétrer les nettoyeurs dans le fourneau, convenablement refroidi, par des ouvreaux pratiqués sur les côtés du fourneau; mais lorsque les chaudières sont en batterie, ces ouvertures ne peuvent plus exister et le ramonage devient moins facile.

Les chaudières Babcock et Wilcox sont extrêmement répandues aux États-Unis, où il en existe plusieurs milliers, représentant des centaines de mille chevaux. Elles commencent à être fort employées en Europe. A l'Exposition, deux générateurs de ce système étaient installés dans la cour de la force motrice et desservaient le réseau du palais des Machines. Chacun de ces générateurs pouvait donner à l'heure 4,000 à

CHAUDIÈRE BABCOCK ET WILCOX.

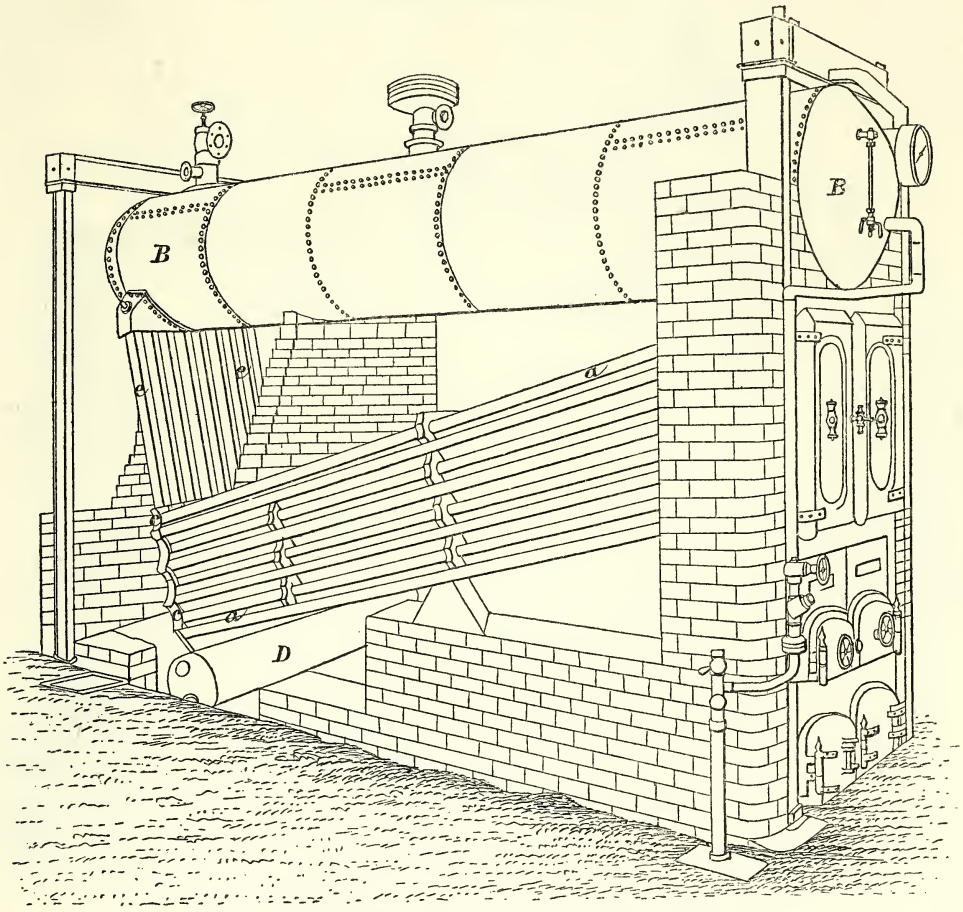


Fig. 21. — Vue perspective avec arrachement du fourneau.

5,000 kilogrammes de vapeur et présentait une surface de chauffe de 258 mètres carrés. Le timbre était de 10 kilogrammes. Cette batterie était accompagnée d'un réchauffeur genre Green, d'une surface de chauffe de 135 mètres carrés.

Le système de chaudières à petits éléments présenté par MM. de Naeyer et Cie, de Belgique, a eu également un grand succès, soit en France, soit à l'étranger. Comme le précédent, il comporte (fig. 22 et 23) un faisceau de tubes pleins d'eau et plongés dans les flammes *AA*, et un corps cylindrique supérieur *BB*, fonctionnant comme réservoir

d'eau et de vapeur; mais il en diffère par la disposition et l'assemblage des tubes, ainsi que par le mode de circulation de l'eau.

Les tubes sont réunis deux par deux, à leurs extrémités, par des boîtes horizontales; cet ensemble de deux tubes, assemblés en forme de rectangles, constitue ce qu'on appelle *un élément;* plusieurs éléments superposés forment *une série;* la superposition

CHAUDIÈRE DE DE NAEYER ET Cie.

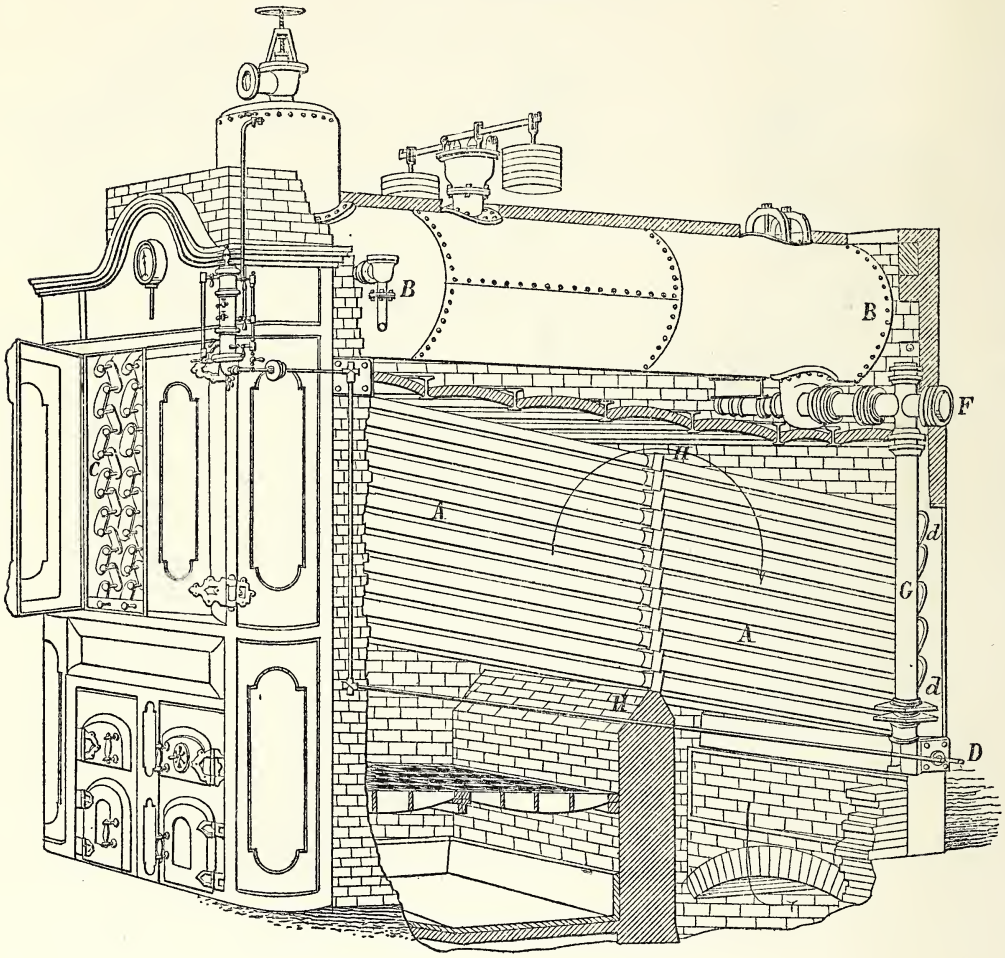


Fig. 22. — Vue perspective.

est faite en serpentant, de manière à chicaner le parcours des flammes; plusieurs séries juxtaposées constituent le faisceau tubulaire, dans lequel les tubes se trouvent disposés en quinconce.

Les boîtes *aa* et *bb* fermant les deux bouts d'un élément sont rectangulaires et percées d'ouvertures vis-à-vis les tubes; des boîtes obliques *cc*, *dd* font communiquer ces ouvertures entre elles, une ouverture de chaque rang étant en relation avec le rang inférieur, l'autre ouverture avec le rang supérieur; du côté du foyer, sur la de-

vanture de la chaudière, l'élément du haut de chaque série est mis en rapport avec un collecteur de vapeur; du côté opposé, l'élément du bas est mis en relation avec un collecteur d'alimentation *D*. Si nous suivons le trajet de l'eau, nous voyons que le liquide, envoyé par le collecteur d'alimentation *D* dans le bas d'une série, s'élève en serpentant jusqu'au haut de la série, et se répand dans tous les tubes qui la composent : la vapeur produite se décharge par le collecteur de vapeur et la conduite *E* dans le récipient d'eau et de vapeur.

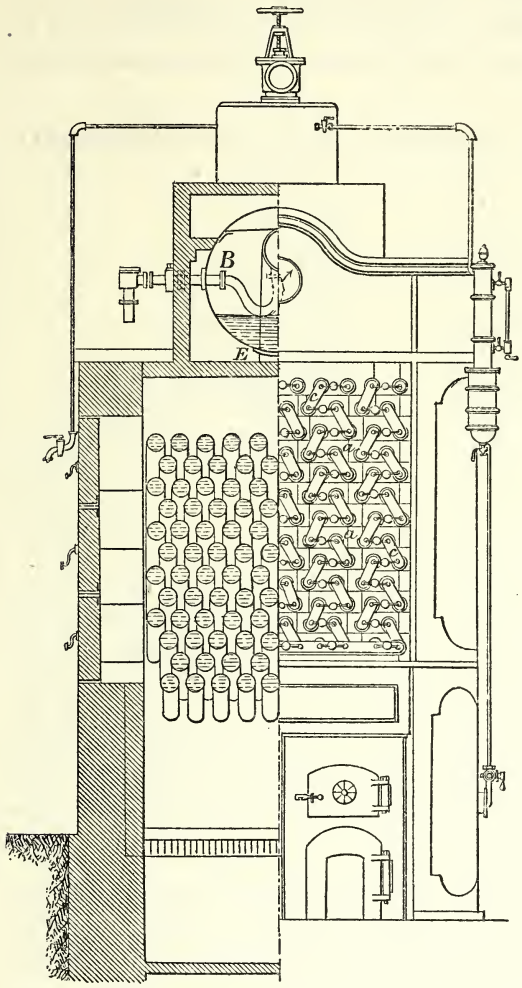


Fig. 23. — Coupe transversale, vue avant.

Voici maintenant comment s'établit la circulation :

Le fond du réservoir *BB* est couvert d'une couche d'eau assez mince, au-dessus de laquelle vient déboucher le courant émis par le collecteur de vapeur; ce courant est un mélange de vapeur et de beaucoup d'eau; il se décante dans le réservoir supérieur, lequel reçoit directement l'eau d'alimentation; les eaux sont reprises dans le bas du réservoir par une grosse conduite *F*, laquelle se bifurque en deux conduites latérales *G*; ces conduites ramènent l'eau au collecteur *D*; dans certains types, on dispose sur leur parcours un épurateur-décanteur.

La figure 24 représente le détail des assemblages des tubes; le joint sur les boîtes rectangulaires *aa* formant l'élément se fait par dudgeonnage; les boîtes obliques *cc* s'assemblent à cru sur un bout de tube *ee* à double cône, par simple appui obtenu au moyen de l'étrier *ff*, serré par le boulon à marteau *gg*. Les boîtes sont en fonte malléable. Le joint biconique est suffisamment élastique; le démontage et le remontage en sont faciles et rapides, ce qui est d'une grande commodité pour le nettoyage intérieur des tubes. Le réservoir supérieur n'est pas en contact avec les gaz chauds; il est donc peu exposé aux accidents.

Le parcours des gaz est chicané par une cloison verticale *HH* (fig. 22). Pour le ramonage, on a, sur les deux façades du fourneau, deux grandes portes; les angles des boîtes rectangulaires sont abattus, de telle sorte que ces boîtes, une fois en place,

IMPRIMERIE NATIONALE.

laissent entre elles de petites ouvertures triangulaires, qui sont ordinairement fermées par des bouchons en fonte; pour ramoner, on ouvre les portes, on retire les bouchons, et par les petits trous on envoie, à l'aide d'une lance, un jet de vapeur le long des tubes; l'opération se fait sans arrêter la marche de la chaudière.

MM. de Naeyer et Cie disposent quelquefois, à la suite de leurs chaudières, des réchauffeurs d'eau d'alimentation, constitués par des faisceaux de tubes montés comme ceux que nous venons de décrire.

L'exposition de cette importante maison se composait de six générateurs fournissant la

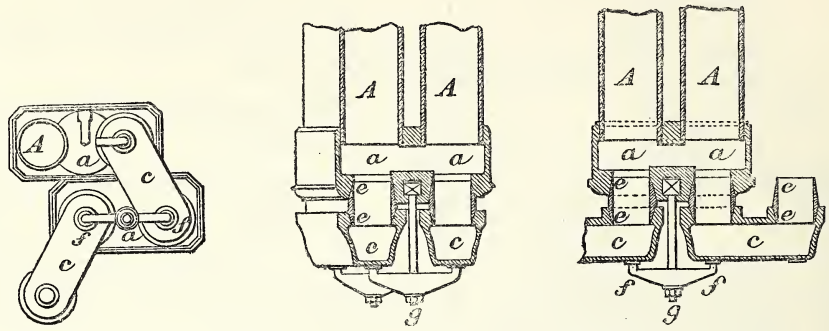


Fig. 24. — Chaudière de de Naeyer, assemblages des tubes.

vapeur au palais des Machines; ces générateurs étaient timbrés à 12 kilogrammes et comportaient des surfaces de chauffe variant de 250 à 320 mètres carrés, soit une surface de chauffe totale de près de 1,700 mètres carrés.

Les chaudières de de Naeyer et Babcock et Wilcox constituent les types les plus importants et de beaucoup les plus répandus des générateurs à petits éléments avec réservoir; ces succès sont dus à la bonne entente de l'ensemble et des détails et aux soins tout particuliers apportés dans la fabrication.

A côté de ces deux types de chaudières viennent se placer un grand nombre d'autres, procédant de principes analogues, mais en différant plus ou moins, soit par des dispositions, soit par des détails de construction. Nous décrirons brièvement ceux qui présentent quelque intérêt. Un ordre tout à fait logique est difficile à établir, mais nous nous efforcerons de rapprocher les systèmes possédant des analogies.

La chaudière imaginée par MM. E. Lagosse et J. Bouché, et construite en France par MM. Daydé et Pillé, de Creil, se rapproche par plus d'un point de la chaudière de de Naeyer. Elle comporte de même (fig. 25, 26, 27) un faisceau tubulaire incliné *AA*; un corps supérieur *BB*, avec double retour d'eau *CC*, communiquant avec le collecteur d'alimentation *D*; le faisceau tubulaire est également composé de tubes réunis par paires formant éléments, superposés en séries; les assemblages fixes sont dudgeonnés, les assemblages mobiles sont constitués par des tubes biconiques et contretenus par des étriers avec boulons à marteau; les communications s'établissent, dans chaque série,

de bas en haut par des boîtes obliques s'élevant en zigzag. Les particularités les plus importantes sont les suivantes :

Le corps cylindrique est plein d'eau presque jusqu'à mi-hauteur, et la vapeur sortant des collecteurs se dégage dans l'eau de ce réservoir ; la circulation est donc fort active ; pour l'assurer d'une manière plus efficace, on a donné à toutes les conduites de circulation d'eau un très gros diamètre ; un collecteur de dépôts *E* est disposé sur le collecteur d'alimentation. Le faisceau vaporisateur est divisé en deux parties, parcourues successivement par le courant de flammes ; la partie basse, qui reçoit directement la radiation du foyer, a son collecteur spécial de vapeur *F* ; un autre collecteur *G* reçoit la vapeur de la partie haute du faisceau tubulaire.

CHAUDIÈRE LAGOSSE ET BOUCHÉ.

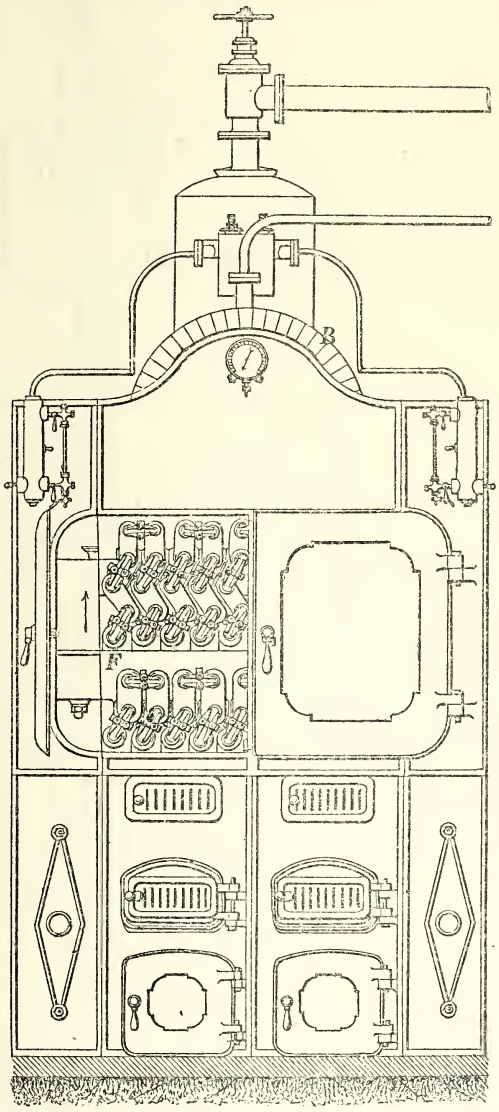


Fig. 25. — Vue de la façade.

Les inventeurs du système se sont efforcés de supprimer les parcours horizontaux du courant ; à cet effet, dans chaque élément, les deux tubes sont, non pas à la même hauteur, mais placés en oblique. Les ancres qui contretiennent les boîtes obliques sont doublées. Enfin, des chicanes, disposées sous le dôme de vapeur, contribuent à assécher la vapeur.

MM. Lagosse et Bouché disposent souvent, à la suite de leur chaudière, un réchauffeur d'alimentation et un sécheur de vapeur ; ces appareils sont constitués par des tubes disposés et assemblés comme ceux du système vaporisateur, à part quelque différence dans la circulation.

MM. Daydé et Pillé avaient installé, dans un pavillon élevé dans la cour de la force motrice, quatre générateurs du système Lagosse et Bouché, lesquels fournissaient la vapeur au palais des Machines et à une des stations d'électricité. Ces chaudières, timbrées à 10 kilogrammes, présentaient des surfaces de chauffe de 67 à 155 mètres carrés, soit, pour les quatre, 446 mètres carrés. Deux d'entre elles étaient munies de réchauffeurs ou de dessécheurs.

MM. Terme et Deharbe ont inventé un système de générateurs à petits éléments, lequel est construit par la Société anonyme coopérative des chaudières inexplosibles, à Paris.

CHAUDIÈRE LAGOSSE ET BOUCHÉ.

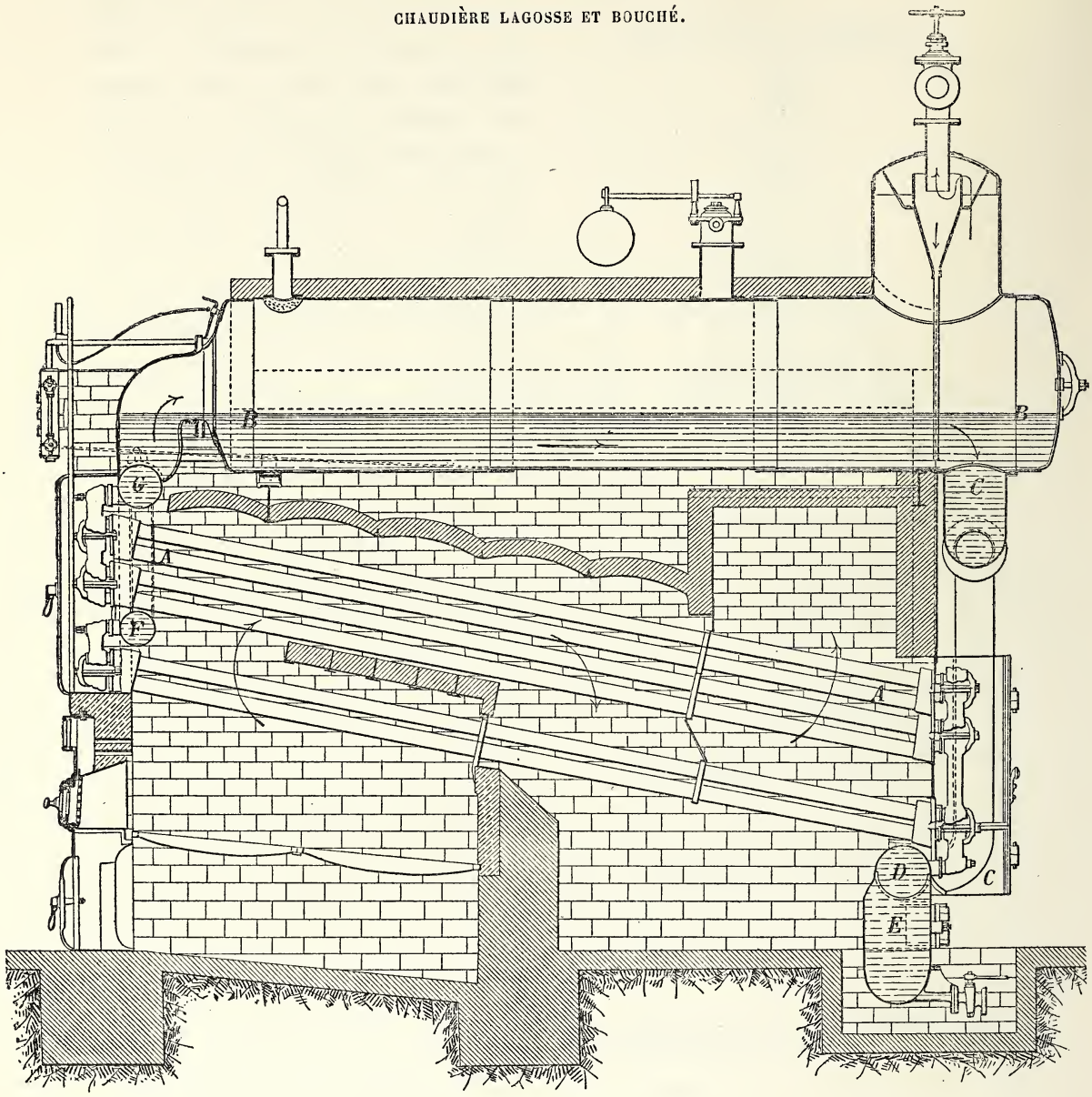


Fig. 26. — Coupe longitudinale.

La chaudière se compose d'un certain nombre de séries verticales superposées; l'ensemble d'une de ces séries ainsi que le mode de circulation sont représentés par les figures 28 à 32 (la fig. 31 est schématique). La série est constituée par plusieurs éléments superposés; chacun de ces éléments est composé de trois tubes; les deux tubes

supérieurs *b* et *c* sont parallèles et inclinés, le tube inférieur *a* est incliné en sens inverse; sur l'arrière de la chaudière, tous les tubes d'une série sont assemblés sur un collecteur carré *AA*; à l'avant, les trois tubes d'un même élément s'assemblent sur une

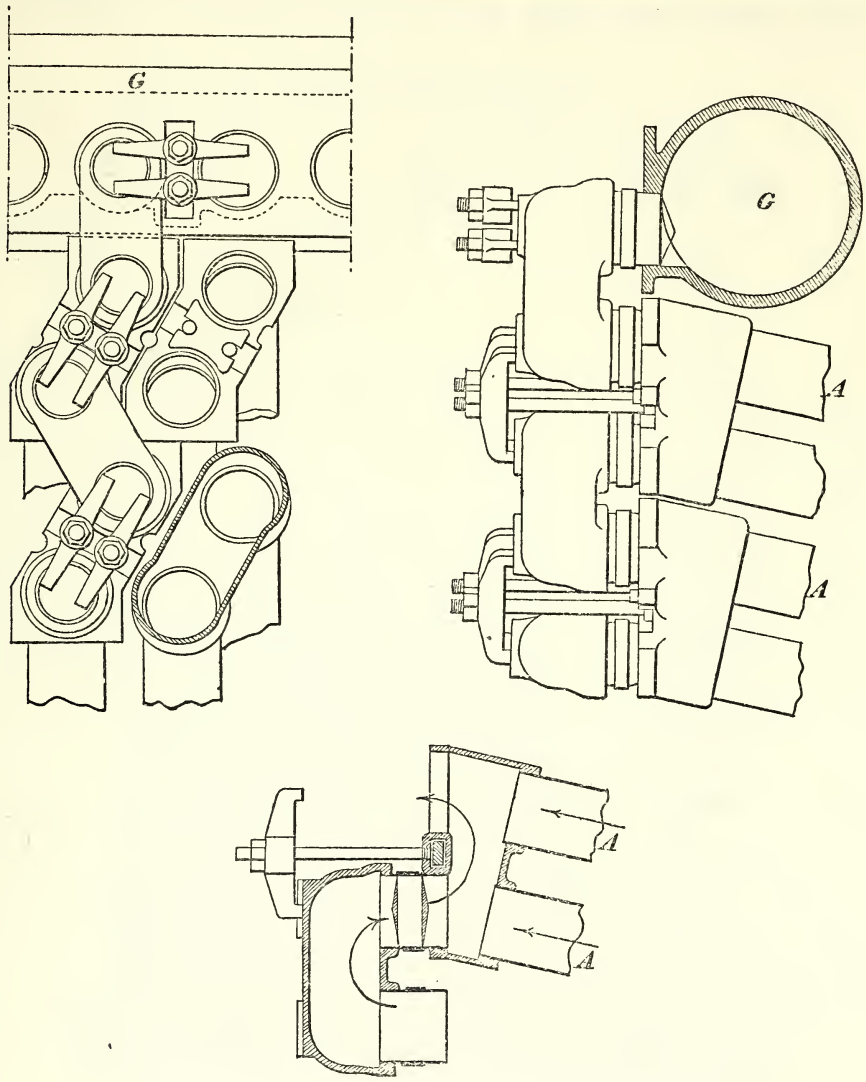


Fig. 27. — Détail des éléments vaporisateurs.

boîte *d*; les boîtes *d* sont simplement superposées, sans communiquer entre elles. Sous l'action de la chaleur, le courant d'eau et de vapeur s'élève dans tous les tubes inclinés; il gagne le sommet du collecteur *AA* et finit par se rendre dans le réservoir supérieur *BB*, à moitié plein d'eau; une conduite verticale *CC* ramène le courant au collecteur d'alimentation *D*, qui l'envoie de nouveau aux diverses séries. Sur le prolongement du tuyau *C* est branché un réservoir de décantation. L'alimentation se fait dans la vapeur.

La figure 32 montre le détail de l'assemblage des tubes sur les boîtes *d*; le tube porte un renfort conique, qui vient s'engager dans un cône correspondant et un peu plus ouvert, fraisé dans la boîte; l'assemblage est contretenu par un boulon à ancre, lequel fait en même temps serrage sur un bouchon; l'étanchéité du joint du bouchon

CHAUDIÈRE TERME ET DEHARBE.

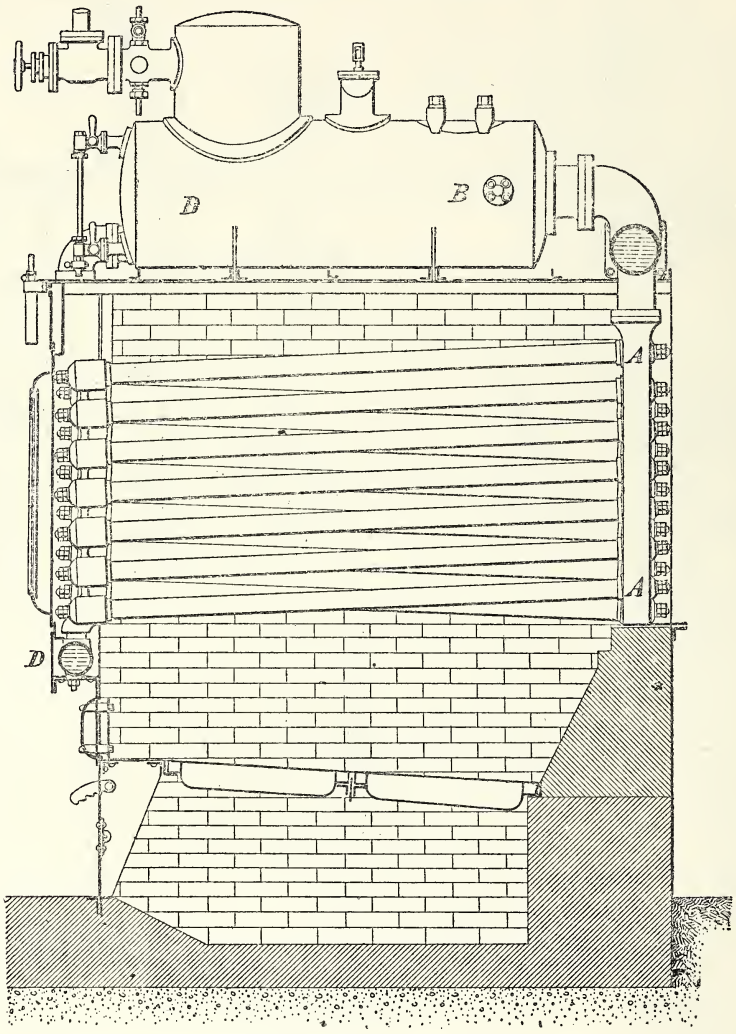


Fig. 28. — Coupe horizontale.

s'obtient par l'interposition de carton d'amiante. Les boîtes *d* sont en fonte malléable. La boîte *A* est en fer forgé et soudé; ses parois planes sont armées par des entretoises filetées; l'assemblage des tubes est fait comme pour les boîtes *d*.

A l'aide de quelques modifications dans les formes de l'appareil, il a été facile d'adapter le type dont il s'agit au service de la navigation. Plusieurs des bateaux-

omnibus naviguant sur la Seine sont munis de cette chaudière. Quatre exemplaires figuraient à l'Exposition et fournissaient la vapeur à la station centrale du Syndicat international des électriciens et à celle de la Société d'éclairage électrique.

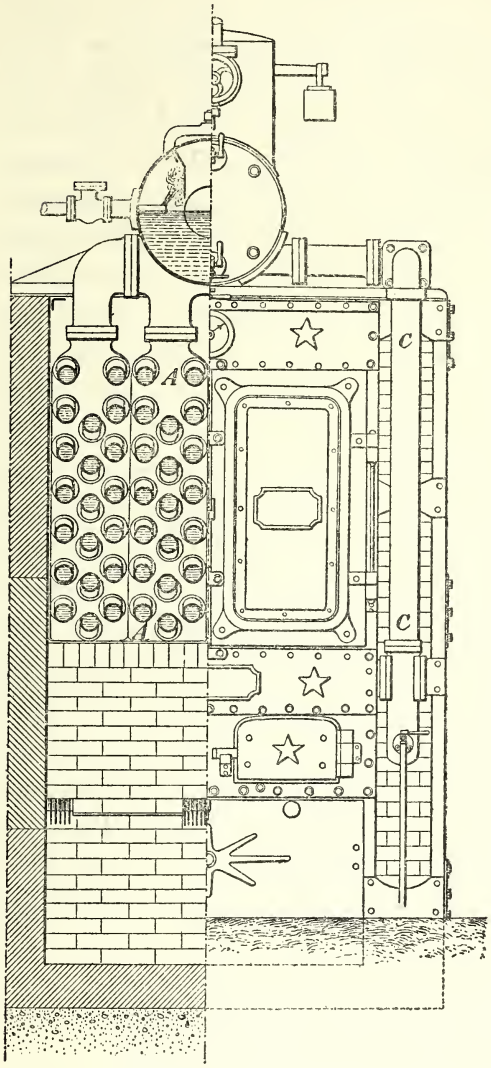


Fig. 29. — Demi-coupe et demi-vue de la façade.

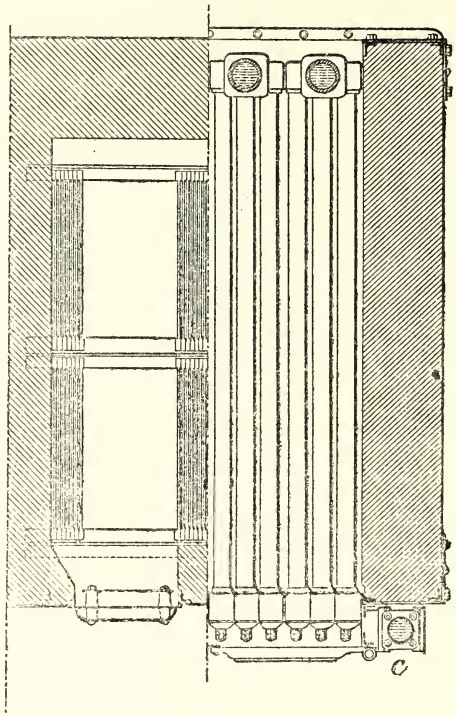


Fig. 30. — Demi-coupes horizontales.

La chaudière imaginée par M. A. Collet est construite par la maison A. Collet et Cie, de Paris, et par divers autres établissements. Le système procède, au point de vue de la circulation de l'eau, de principes analogues à ceux qui président au fonctionnement des chaudières Field.

Chacun des tubes constituant la surface de chauffe est incliné et renferme un second tube qui lui est concentrique (fig. 33 à 36). Le tube extérieur *AA*, formant

une portion de la surface de chauffe, est appelé *tube vaporisateur;* il est fermé dans le bas. Le tube intérieur *BB*, ou *tube directeur,* est ouvert aux deux bouts. Comme dans un tube Field, la circulation est descendante dans le tube directeur, qui ne renferme que de l'eau, et ascendante dans le tube vaporisateur, lequel contient un mélange d'eau et de vapeur. Les vaporisateurs, superposés en plus ou moins grand nombre, viennent tous aboutir à un collecteur vertical *CC*; deux plans verticaux de vaporisateurs sont assemblés sur un même collecteur et constituent un élément; plusieurs éléments juxtaposés forment l'ensemble de l'appareil producteur de vapeur; au-dessus est établi un réservoir d'eau et de vapeur *DD*, dans lequel aboutissent tous les collecteurs. Chaque collecteur est divisé en deux compartiments *aa* et *bb* par une cloison verticale *cc*; les vaporisateurs débouchent dans le compartiment d'arrière *bb*, les directeurs dans le compartiment d'avant *aa*. Au moyen de ces dispositions, la circulation

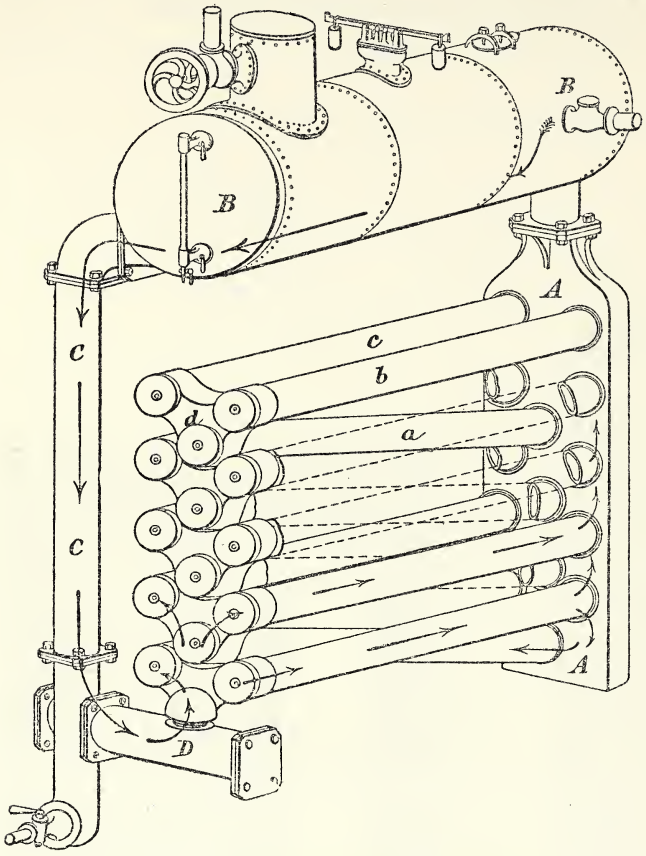


Fig. 31. — Circulation de l'eau et de la vapeur.

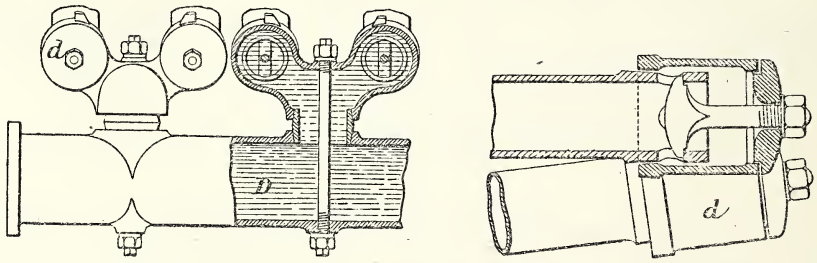


Fig. 32. — Assemblage des tubes.

va s'établir comme il suit : un vaporisateur quelconque envoie sa vapeur dans le compartiment d'arrière *bb*, lequel se trouve rempli d'un mélange d'eau et de vapeur, qui se rend dans le réservoir *D*, où se fait la décantation; le compartiment d'avant *aa* ne

CHAUDIÈRE SYSTÈME A. COLLET.

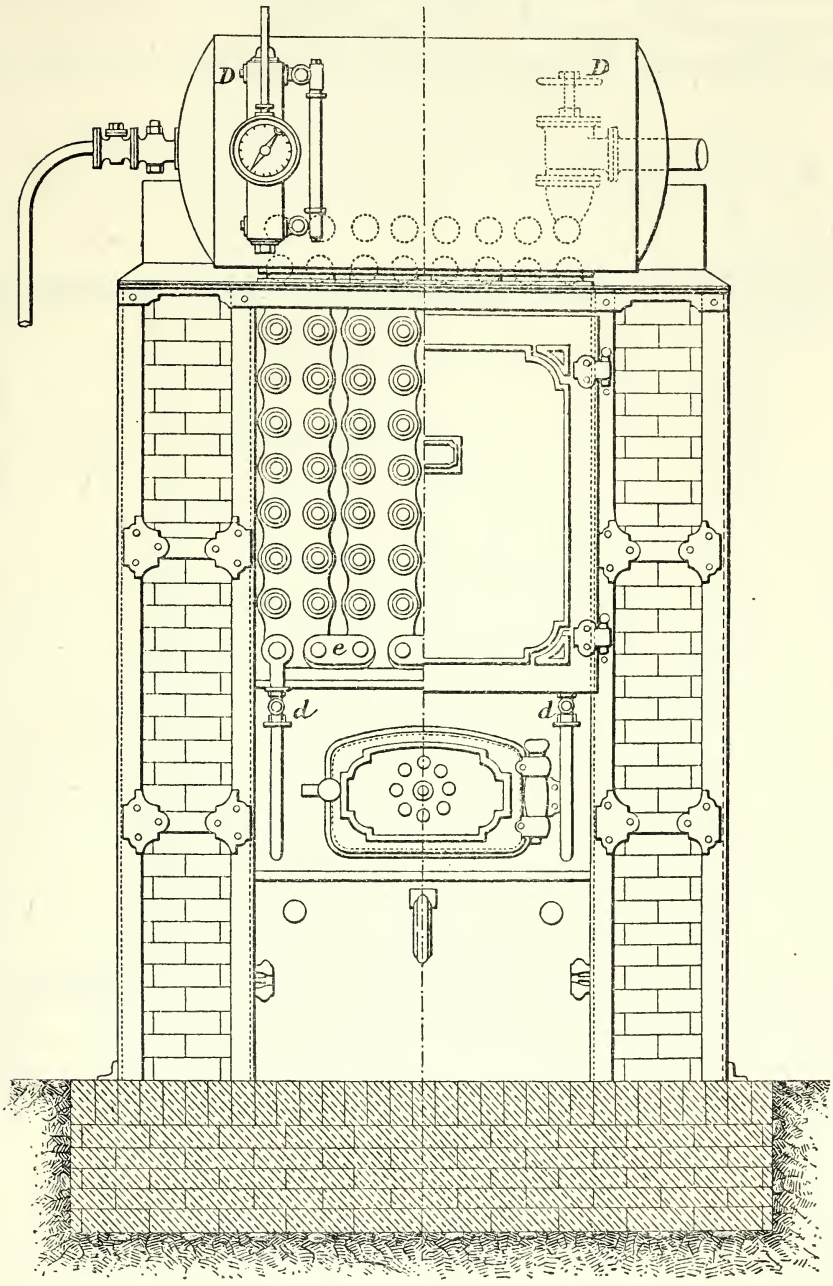


Fig. 33. — Élévation.

contient que de l'eau; de là, une rupture d'équilibre, qui détermine un courant continu descendant en *aa*, parcourant de haut en bas les tubes directeurs, et revenant, par les vaporisateurs et les chambres arrière *bb*, au réservoir *D*; pour rendre ce mouvement

plus uniforme, on a donné à la cloison médiane *cc* une légère inclinaison par rapport aux parois du collecteur, de telle sorte que les sections offertes au passage des fluides aillent en augmentant en proportion du volume à débiter.

La plus grande partie des dépôts résultant du chauffage et de la vaporisation de

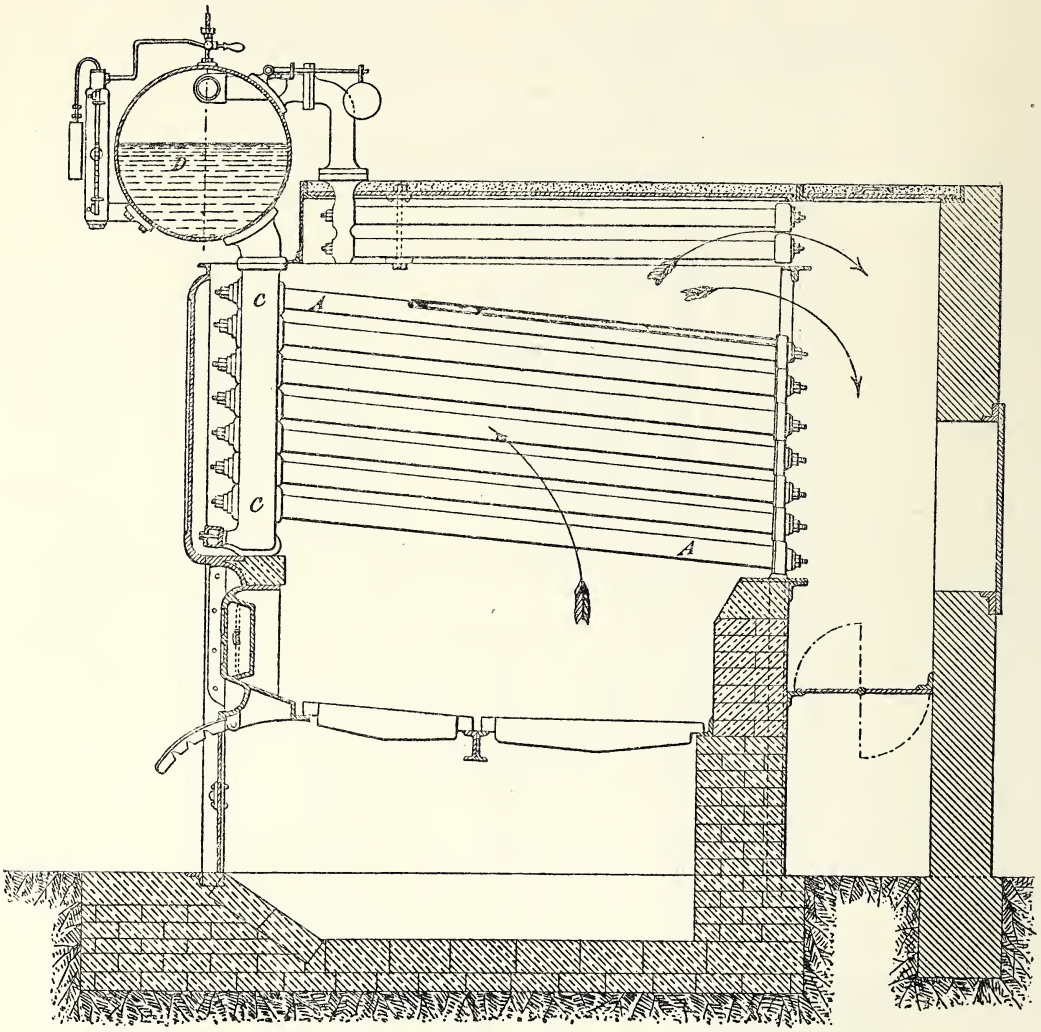


Fig. 33. — Coupe longitudinale.

l'eau viennent se réunir dans le bas de la chambre avant *aa* des collecteurs, capacité où règne un calme relatif. Il suffit, pour les extraire, de purger par les robinets *dd*; grâce aux bouchons de réunion *e*, qui font communiquer entre eux les divers collecteurs, la purge se fait à la fois dans tous les éléments.

Décrivons la construction de quelques-uns des organes de cette ingénieuse chaudière.

Les tubes vaporisateurs sont en fer; les collecteurs sont en fonte; les boîtes d'arrière

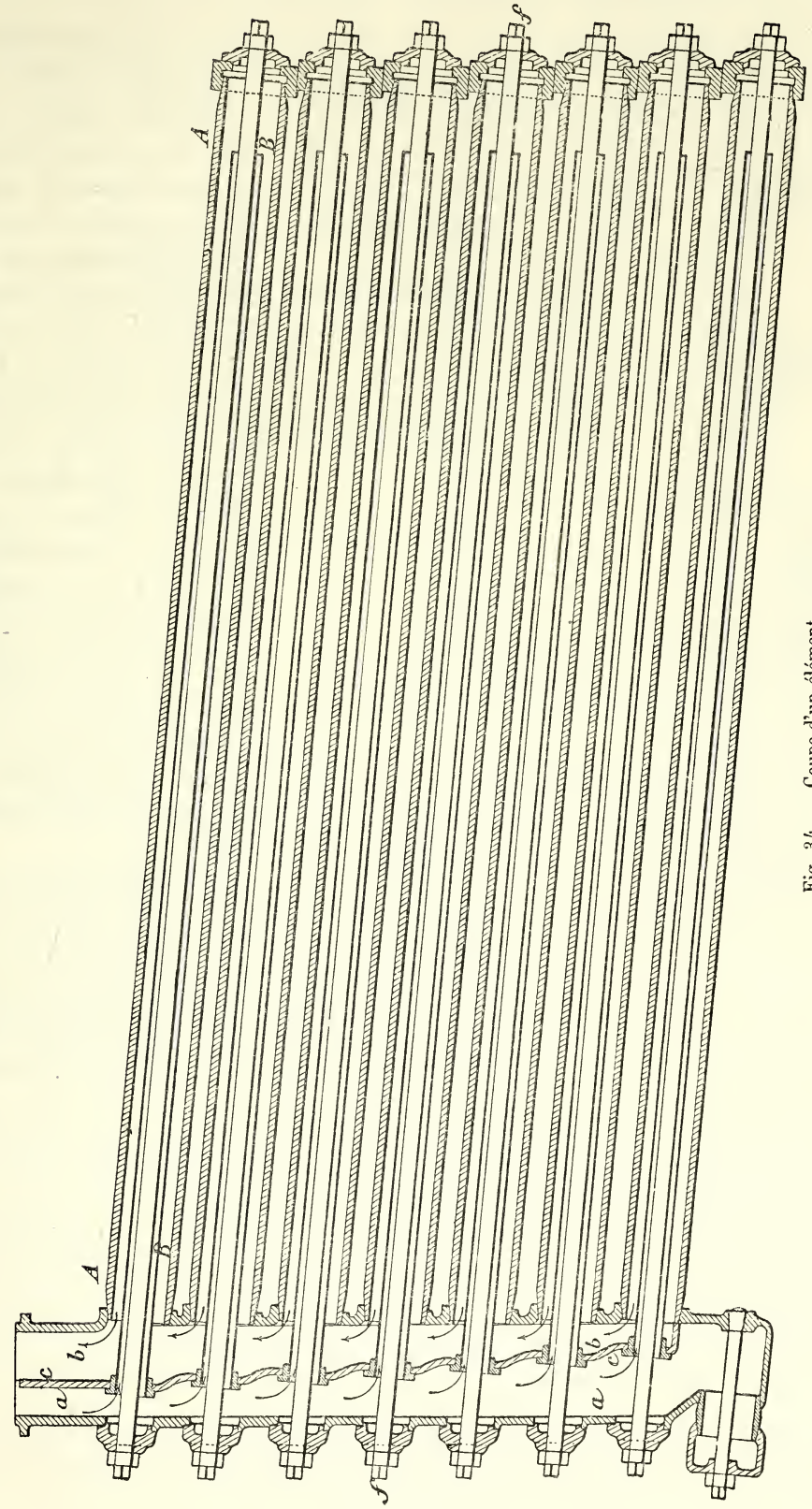


Fig. 34. — Coupe d'un élément.

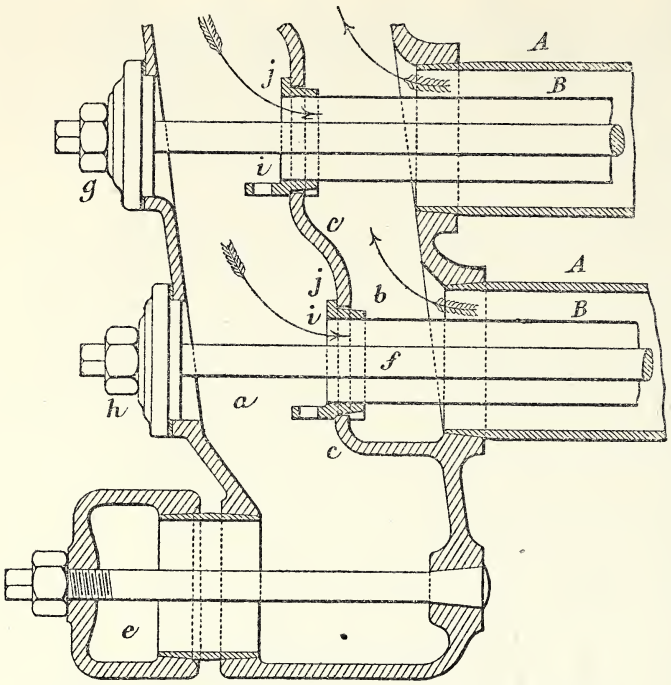


Fig. 35. — Collecteur et emmanchement des tubes à l'avant.

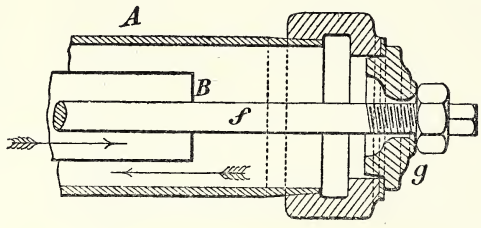


Fig. 36. — Emmanchement des tubes à l'arrière.

sont en fonte malléable; les assemblages se font à cru entre parties coniques tournées; ils sont contretenus par de longs boulons *ff*, qui forment eux-mêmes un des détails caractéristiques du système; les écrous qui terminent les boulons serrent sur leurs sièges les bouchons *g*, *h*, lesquels forment joint étanche, par l'interposition de rondelles de carton d'amiante. Il suffit de dévisser les écrous pour pouvoir retirer le boulon, les deux bouchons et même, au besoin, la boîte arrière et le tube. Cette facilité du démontage et du remplacement des divers organes est une des propriétés intéressantes de la chaudière Collet.

Les tubes diviseurs sont en laiton mince; ils sont munis d'un renflement *i*, qui s'engage librement dans les ouvertures de la cloison médiane; un anneau *j* permet de les retirer facilement par l'ouverture de la boîte avant. Le joint conique est aussi employé pour l'assemblage des bouchons de réunion *e*.

Dans quelques installations, les chaudières Collet sont accompagnées de sécheurs de vapeur; ce cas est représenté sur la figure 33 ci-dessus.

Plusieurs générateurs Collet fournissaient la vapeur à l'Exposition; une puissante batterie de quatre chaudières faisait le service de l'ascenseur de la tour Eiffel; elle était installée dans un des piliers de la tour; deux autres chaudières du même système desservaient la machine à glace, installée dans le pavillon de la République Argentine, et la machine élévatoire établie sur la berge de la Seine par MM. de Quillacq et Meunier.

MM. N. Roser et Morane jeune ont établi un système de générateurs, dont la construction est faite par M. N. Roser, constructeur à Saint-Denis (Seine). Ce système, comme

dispositions générales, se rapproche de celui de MM. Babcock et Wilcox; d'ailleurs la construction en est très soignée et comporte des détails ingénieux (fig. 37). Les tubes, longs et légèrement inclinés, sont assemblés aux deux bouts par dudgeonnage dans des

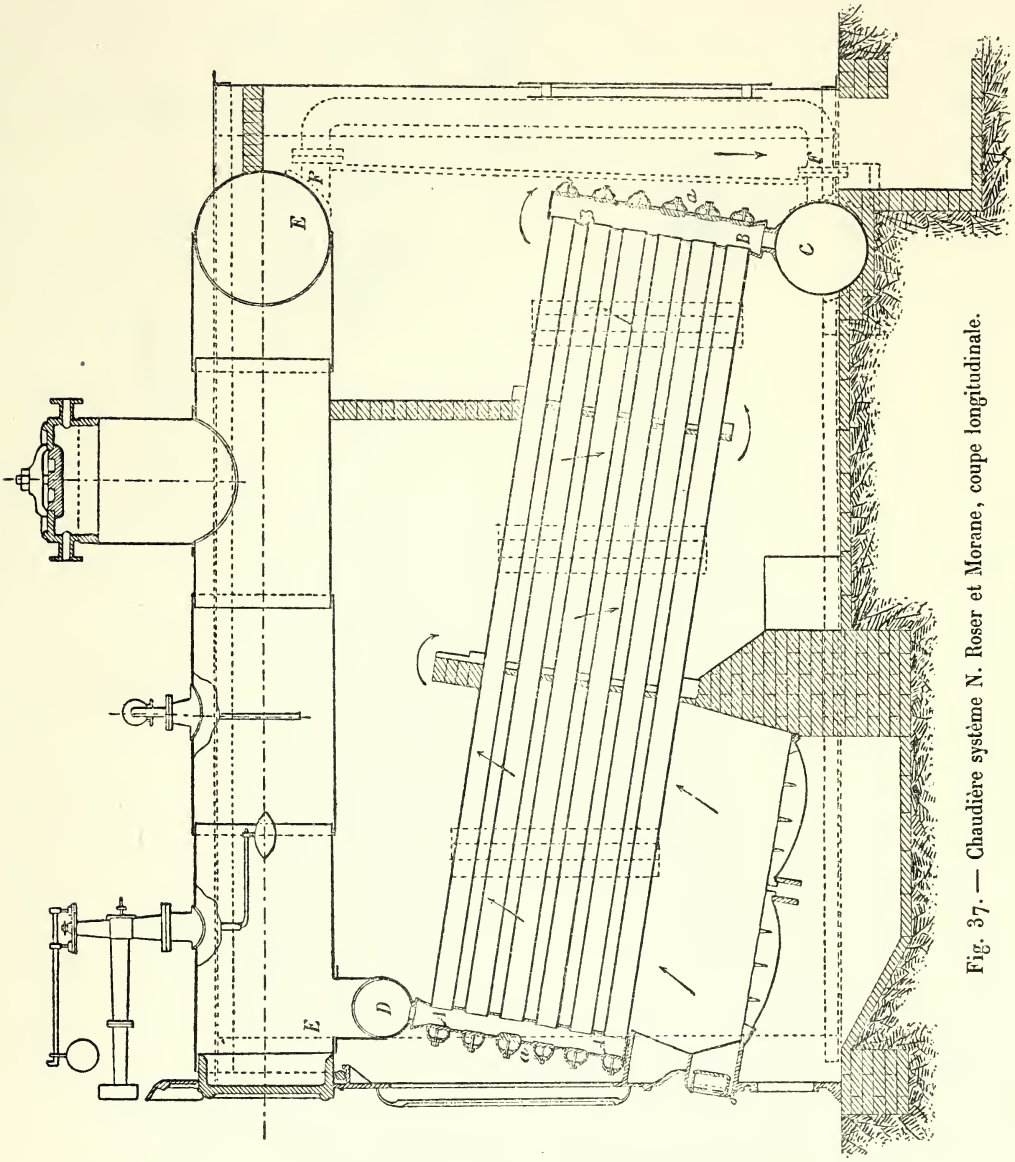
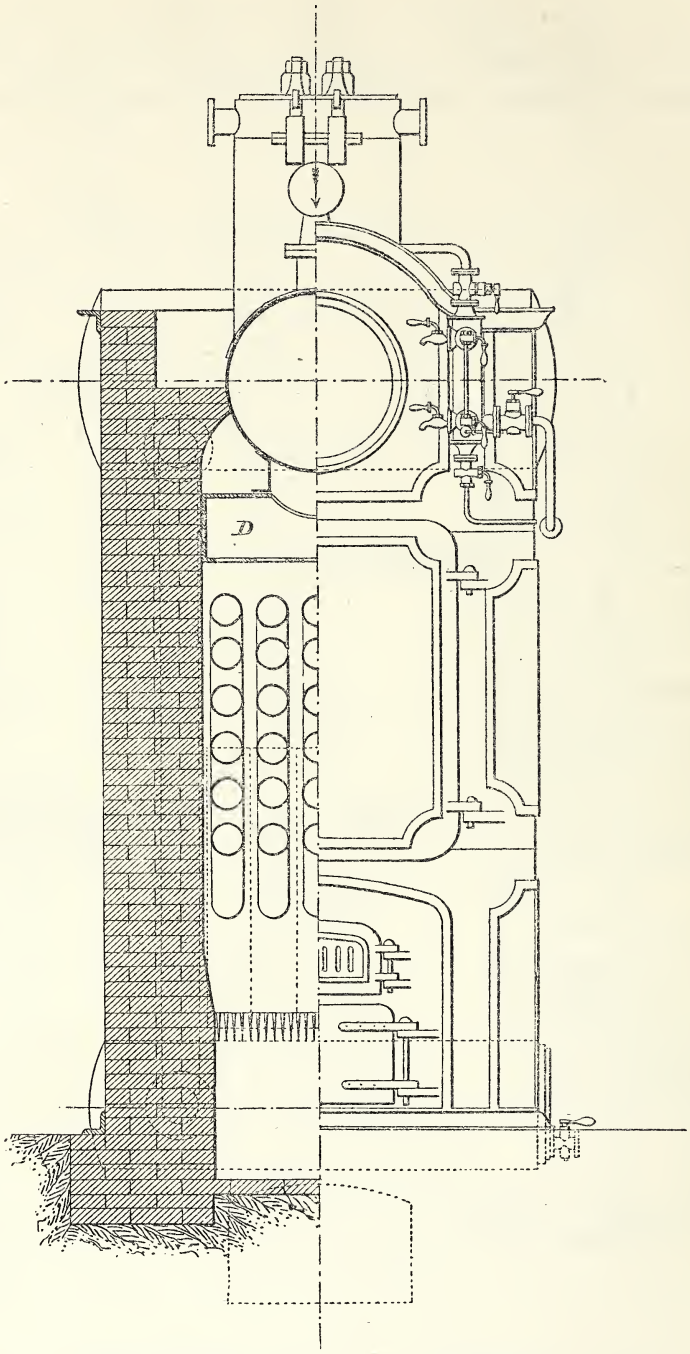


Fig. 37. — Chaudière système N. Roser et Morane, coupe longitudinale.

boîtes rectangulaires *AA* et *BB* en tôle soudée; les boîtes d'arrière aboutissent à un gros décanteur *C*, celles d'avant à un collecteur de vapeur *DD*, mis en relation par un gros cuissard avec le réservoir *EE*; la circulation est complétée par les deux conduites *FF*. Les trous de visite, percés vis-à-vis les ouvertures des tubes, sont fermés par des autoclaves ronds; on les introduit par l'une des ouvertures *a*, *a*, laquelle est ovale et

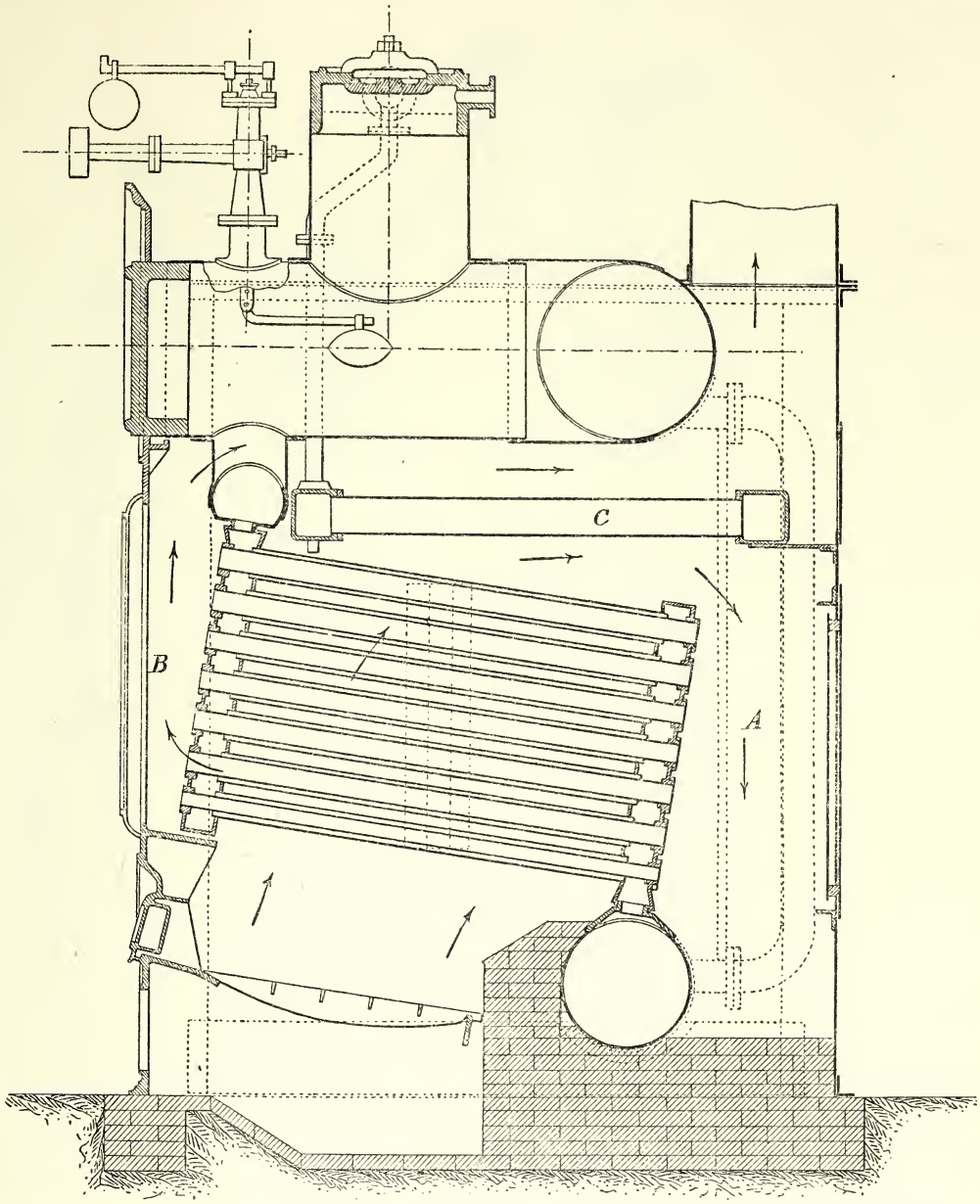


Coupe transversale. Vue de face.

Fig. 37. — Chaudière système N. Roser et Morane.

fermée par des autoclaves ovales. Les joints des boîtes avec les collecteurs sont coniques. Toute cette construction est fort simple, solide et bien entendue.

Comme variété de ce système, pour les cas où l'emplacement fait défaut, M. Roser présente un dispositif (fig. 38) à doubles tubes concentriques, combinaison de la

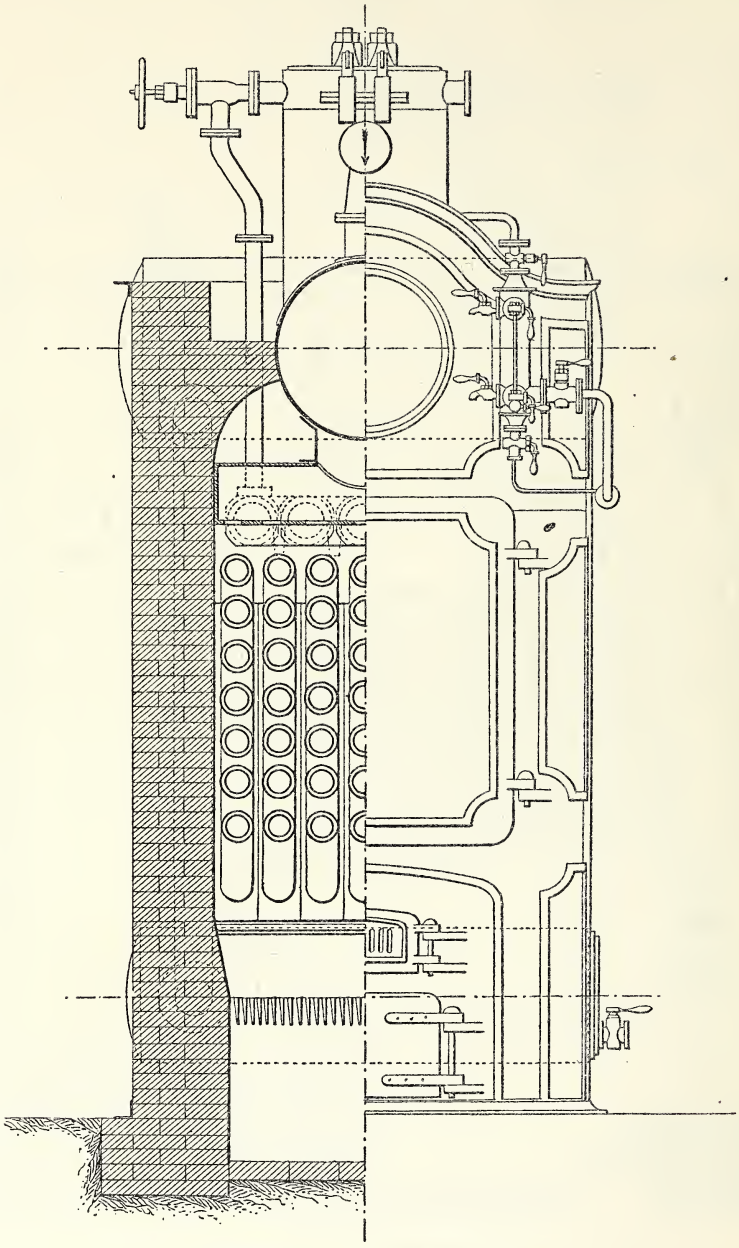


Coupe longitudinale.

Fig. 38. — Chaudière système Roser.

chaudière tubulaire avec la chaudière à petits éléments; après avoir chauffé extérieurement le faisceau de tubes, les fumées se répandent dans la chambre *A*, traversent les tubes intérieurs, se rendent dans la chambre *B* et, de là, dans la cheminée en

léchant les parois du sécheur *C*. Le nettoyage des tubes, bien moins facile qu'avec le dispositif précédent, exigeait certaines précautions; on y a pourvu en rendant les tubes



Coupe verticale. Vue de face.

Fig. 38. — Chaudière système Roser.

extérieurs amovibles par le procédé Bérendorf (voir ci-dessus, p. 53), dont on a augmenté la solidité en filetant le petit bout de l'un des cônes et y vissant un écrou, qui serre contre la plaque tubulaire correspondante.

L'installation faite à l'Exposition par la maison Roser était fort importante; elle comportait quatre groupes différents, savoir :

Batterie de cinq chaudières, établie dans la cour de la force motrice et desservant le palais des Machines;

Batterie de quatre chaudières, installée dans le jardin, entre le palais des Machines et les galeries des expositions diverses, et desservant les machines de la Société pour la transmission de la force par l'électricité;

Une autre chaudière, dans le même emplacement, pour le service du Syndicat international des électriciens;

Batterie de deux chaudières, sur la berge de la Seine, fournissant la vapeur aux machines de Lecouteux et Garnier, lesquelles actionnaient les dynamos de la Société électrique.

Ces chaudières se rapportaient à l'un ou à l'autre des deux types que nous avons décrits.

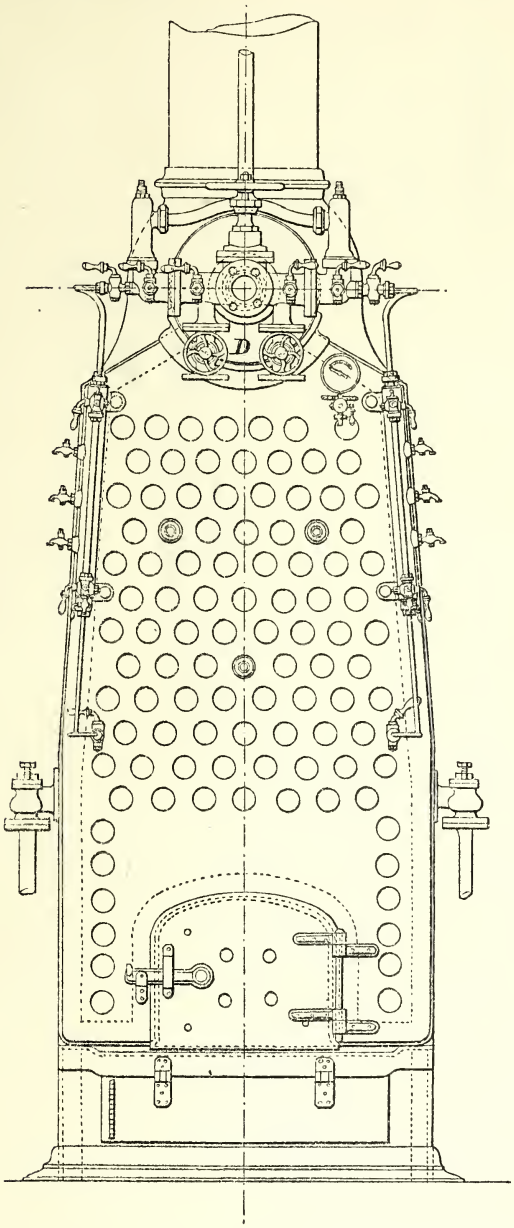


Fig. 39. — Chaudière système Oriolle.

M. P. Oriolle, constructeur à Nantes, a établi un système de chaudières (fig. 39) ayant pour objet principal le service des petites embarcations; il l'a étendu ensuite aux embarcations plus importantes et aux installations fixes. Le constructeur s'est efforcé de rendre son appareil très compact et d'en réduire autant que possible l'encombrement. Le faisceau de tubes parallèles *AA*, très serré, aboutit à deux lames d'eau *BB* et *CC* de faible épaisseur, armées d'entretoises filetées et analogues aux lames d'eau des foyers de locomotives; dans le bas, ces lames d'eau entourent la grille; dans le haut, elles aboutissent à un réservoir de vapeur *DD*.

Le niveau normal de l'eau est en dessous du sommet du faisceau tubulaire; les tubes du haut servent de sécheurs.

IMPRIMERIE NATIONALE.

Les tubes sont assemblés par dudgeonnage; vis-à-vis chaque tube est percée, dans la paroi opposée de la lame d'eau, une ouverture servant à introduire le dudgeon et à

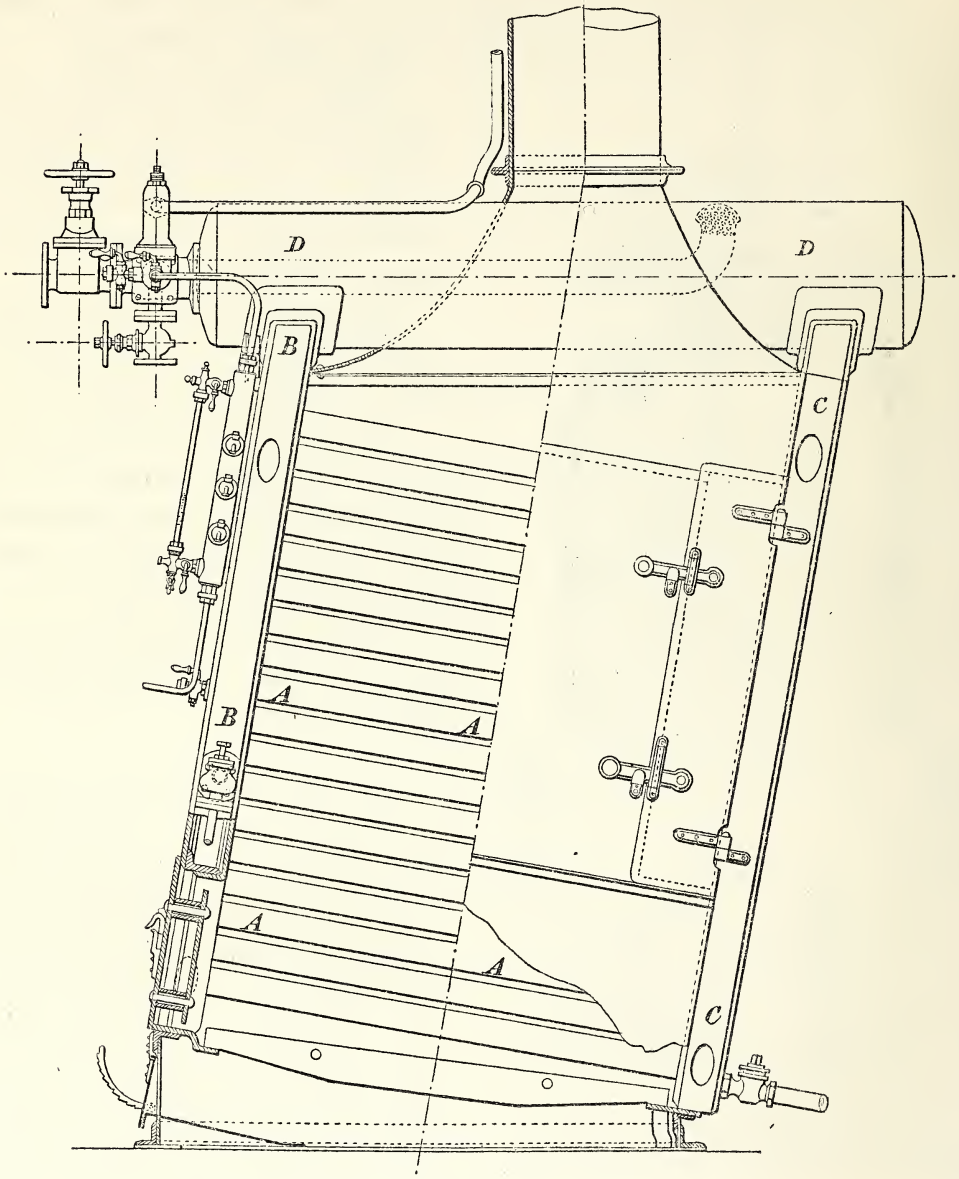


Fig. 39. — Chaudière système Oriolle.

nettoyer l'intérieur du tube; elle est bouchée par un autoclave fermant sur joint en caoutchouc. De distance en distance, un tube est supprimé, et son emplacement sur la plaque tubulaire est occupé par une entretoise creuse permettant d'introduire dans le faisceau une lance à vapeur pour le nettoyage des tubes.

La chaudière représentée (fig. 40) a été imaginée par M. Prosper Hanrez; elle est construite par la maison Zimmermann, Hanrez et Cie, à Monceau-sur-Sambre (Belgique). La partie active de la chaudière est constituée par un faisceau tubulaire aboutissant à

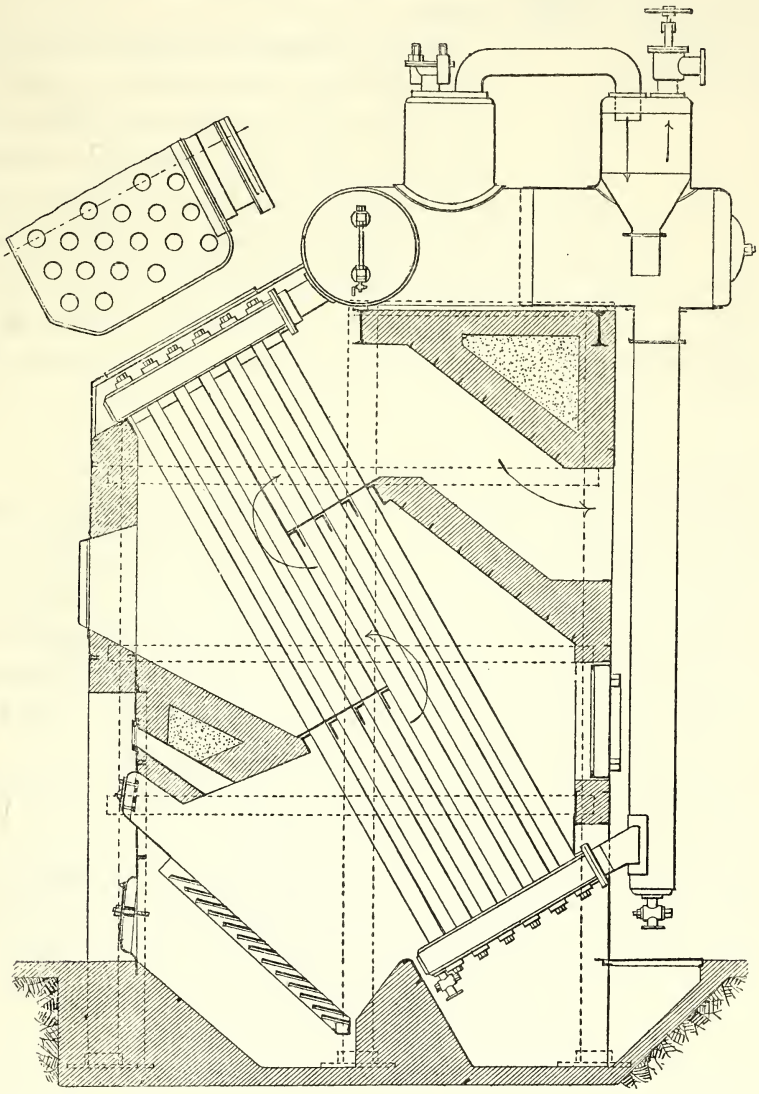


Fig. 40. — Chaudière système Prosper Hanrez.

deux lames d'eau en chaudronnerie. Ce qui caractérise le système, c'est la grande inclinaison donnée au faisceau tubulaire, lequel est presque vertical. L'adjonction d'un réservoir supérieur d'eau et de vapeur et d'une conduite verticale de retour assure une circulation active. Des écrans dirigent le parcours des flammes; un système de chicanes contribue à l'assèchement de la vapeur. Des ouvertures pour le dudgeonnage et la visite sont ménagées vis-à-vis chaque tube; les bouchons de fermeture sont fort ingé-

C. F. E.

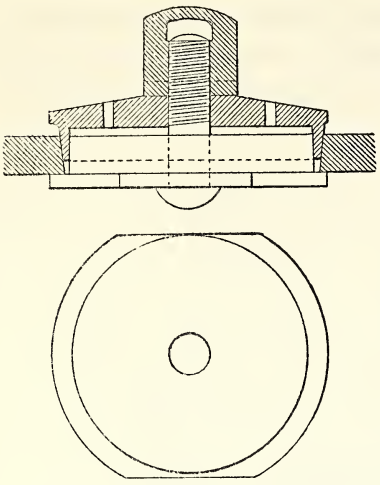


Fig. 40.
Chaudière système Prosper Hanrez.

nieusement disposés en vue d'assurer l'étanchéité du joint et de garantir contre les projections en cas de rupture du boulon; le croquis ci-joint suffit pour faire comprendre le fonctionnement de cet élégant organe.

Nous ne poursuivrons pas plus loin la description des générateurs à petits éléments munis de réservoirs d'eau ou de vapeur. Outre celles de ces chaudières que nous avons étudiées ci-dessus, on en voyait à l'Exposition beaucoup d'autres, qui étaient loin d'être sans mérite; si nous les passons sous silence, c'est que leurs dispositions présentent moins d'originalité, ou bien qu'une pratique un peu étendue n'en a pas encore consacré la valeur.

Passons aux générateurs à petits éléments sans réservoir.

La suppression du réservoir présente, au point de vue des garanties de sécurité, une sérieuse importance. Réduire au minimum le volume intérieur d'une chaudière, c'est restreindre dans une proportion équivalente les effets dynamiques que l'on peut redouter en cas d'explosion; c'est aussi exalter au suprême degré les qualités, en même temps que les défauts, que nous avons reconnus, en général, aux générateurs à petits éléments. M. Belleville s'est attaché avec une ténacité indomptable à cette tâche ingrate, et il a réussi là où tant d'autres ont dû abandonner la partie.

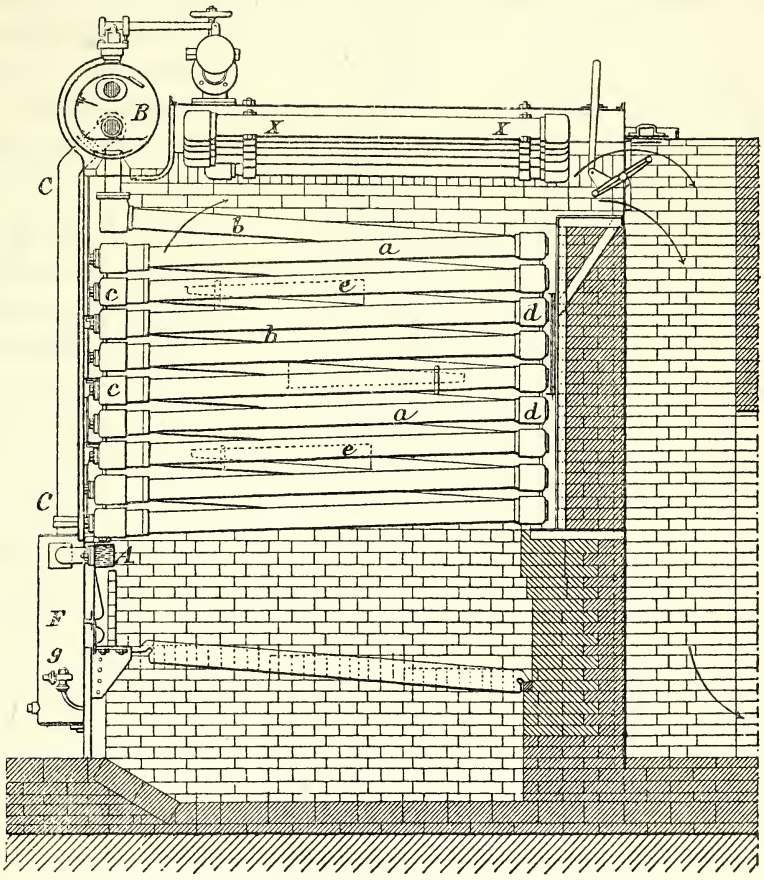
La chaudière Belleville, construite par la maison Belleville et Cie, de Saint-Denis (Seine), est fort connue; nous la décrirons brièvement.

Le système vaporisateur est constitué par un certain nombre d'éléments juxtaposés (fig. 41); chaque élément a la forme d'une conduite continue, plongée dans les gaz du foyer, recevant l'eau par le bas et envoyant par le haut la vapeur dégagée sur son parcours; cette conduite, ascendante sur toute sa longueur, est repliée sur elle-même et forme, dans son ensemble, une sorte d'hélice enroulée sur un prisme vertical à base rectangulaire très allongée; les grands côtés sont constitués par des tuyaux *aa* et *bb* inclinés, ceux de droite dans un sens, ceux de gauche en sens contraire; les petits côtés de l'hélice sont des boîtes *cc* et *dd*, recevant chacune les abouts de deux tubes consécutifs; les éléments, rangés dans le fourneau à côté les uns des autres, communiquent par le bas avec un collecteur d'alimentation *AA*, et par le haut avec un collecteur de vapeur *BB*.

La chaudière, en allure normale, ne contient qu'une quantité d'eau insuffisante pour remplir tous les tubes, mais, par l'effet de l'ébullition, une grande quantité d'eau est entraînée mécaniquement par la vapeur; cette eau se sépare dans le collec-

teur *BB*, qui reçoit en même temps l'eau d'alimentation : le retour d'eau au collecteur *AA* a lieu par la conduite verticale *CC*.

Les tubes sont en fer; les boîtes sont en fonte malléable; les joints des tubes sur les boîtes sont à vis et renforcés par des colliers taraudés formant contre-écrous; les boîtes d'avant portent, vis-à-vis chaque tube, un trou de nettoyage fermé par un bouchon que serre un boulon à ancre. Les boîtes s'appuient, sans assemblage, les unes



Coupe longitudinale.

Fig. 41. — Générateur système Belleville.

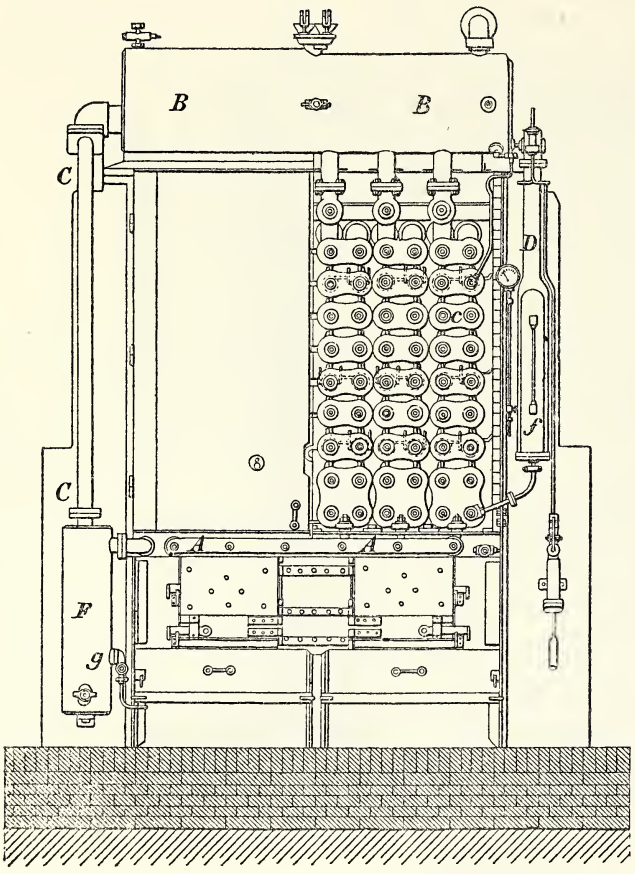
sur les autres, ce qui rend les dilatations très libres. L'enlèvement d'un élément se fait facilement, par le démontage de ses joints sur les collecteurs d'eau et de vapeur; la mise en place d'un élément neuf est non moins facile.

Pour le transport, on peut diviser la chaudière en parties d'un faible poids, dont l'assemblage peut être fait sans le concours d'ouvriers spéciaux, ce qui offre de sérieux avantages pour les installations en pays de montagne et dans les localités d'un accès difficile.

Les gaz émis par le foyer rencontrent une série de chicanes *ee*, composées de gout-

tières en tôle légère reposant sur les tubes. Le ciel du fourneau est, en général, occupé par une série de tubes formant sécheurs de vapeur. La construction du fourneau lui-même est très simple et l'emplacement qu'il occupe dépasse à peine la surface couverte par la grille. Deux larges portes, ouvertes sur la devanture, permettent de visiter les boîtes avant et de ramoner les tubes à l'aide d'un jet de vapeur, sans arrêter le fonctionnement de l'appareil.

La grille employée par la maison Belleville, ainsi que les appareils fumivores qui y sont d'ordinaire adjoints, présentent des dispositions intéressantes sur lesquelles nous aurons occasion de revenir.



Vue de face. Vue de face (les portes enlevées).

Fig. 41. — Générateur système Belleville.

Le collecteur de vapeur est un récipient de petite dimension, lequel ne joue en aucune façon le même rôle que les réservoirs d'eau et de vapeur superposés aux générateurs à petits éléments, dont nous avons fait précédemment l'étude. Cette suppression de toute capacité un peu volumineuse, qui constitue d'ailleurs le caractère distinctif du système, a pour effet d'exagérer encore les inconvénients qui se présentent dans la conduite des autres générateurs à petits éléments, et cela à un tel degré, que les procédés ordinaires usités en pareil cas pour les combattre deviendraient radicalement impuissants. Il a donc fallu imaginer de nouveaux organes, pour ramener l'allure de ces générateurs à être régulière et industrielle; l'étude de ces organes, des moyens de les construire et d'en rendre le jeu sûr et pratique a été une œuvre de longue haleine, qui a exigé de patientes recherches et une grande dépense d'ingéniosité. Ces organes, nous ne les décrivons pas, pour le moment, en détail; ils seront mieux à leur place dans la section consacrée aux accessoires de chaudières, mais il convient, dès maintenant, d'en indiquer le jeu et le principe.

Les perturbations que tend à produire le faible volume des réserves d'eau et de vapeur peuvent se ranger sous quatre chefs :

1° Instabilité de la pression;

2° Instabilité du plan d'eau;

3° Entraînements d'eau;

4° Encrassement de la chaudière.

Passons en revue ces différentes perturbations, ainsi que les moyens employés pour s'en rendre maître.

1° Dans un générateur ordinaire, la masse d'eau contenue peut emmagasiner ou fournir des quantités considérables de chaleur sans qu'il en résulte des variations bien importantes de la température et de la pression; cette masse agit à la façon d'un volant puissant, qui absorbe ou restitue, suivant que la production ou la consommation sont prédominantes. Le volume d'eau contenu dans une chaudière à bouilleurs représente dix ou quinze fois la quantité de vapeur qu'elle produit par heure en allure normale. Dans une chaudière Belleville, il en est tout autrement : la réserve d'eau n'est guère que le tiers ou le quart de la vaporisation horaire, c'est-à-dire que, toutes choses égales, elle est trente ou quarante fois plus petite que dans la chaudière à bouilleurs. Réduit à des proportions aussi minimes, le magasin de chaleur ne peut plus remplir par lui-même son rôle de régulateur de la pression; si attentif et soigneux que puisse être le chauffeur, il ne saurait gouverner son feu avec assez de promptitude pour empêcher la pression de subir à chaque instant des variations rapides et étendues. Il a donc fallu lui venir en aide par des procédés automatiques; ces procédés, dans les chaudières Belleville, sont au nombre de deux :

En premier lieu, l'ouverture du registre est réglée automatiquement par la pression qui règne dans la chaudière. Que l'on imagine un piston recevant en dessous la pression qui règne dans le générateur, et en dessus la charge d'un ressort; ce piston va prendre à chaque instant une position d'équilibre; il s'élèvera quand la pression augmentera et s'abaissera quand la pression diminuera; ces mouvements sont transmis par un système de leviers au registre, qui ferme plus ou moins le passage des gaz de la combustion, de manière à réduire ou activer le tirage et, par suite, la production de la vapeur, suivant que la pression est plus ou moins élevée.

Dans la chaudière Belleville, le registre est une valve tournante, équilibrée autour de son axe; le ressort qui charge le piston régulateur a cette forme particulière, inventée par M. Belleville, et appliquée dans les cas où l'on a besoin de résister à des efforts considérables, tout en conservant aux mouvements une élasticité parfaite; il est composé de coupes coniques en acier empilées les unes sur les autres.

Quelle que soit l'efficacité du système que nous venons de décrire, son action n'eût pas été assez rapide pour suivre les variations qui se produisent incessamment dans le régime d'écoulement de la vapeur. Il a fallu accepter les oscillations inévitables de la

pression; on les corrige au moyen d'un organisme disposé sur la conduite de prise de vapeur, le *détendeur régulateur*. C'est un piston, chargé de poids et de ressorts antagonistes, et qui reçoit en dessous la pression de la vapeur dans la partie de la conduite aboutissant à la machine; la charge du piston est réglée de manière à faire équilibre à une pression inférieure de quelques kilogrammes à la pression de régime de la chaudière; en amont de ce piston, la conduite est étranglée par un orifice percé dans une glace, sur laquelle se meut un tiroir équilibré, actionné par le piston; les transmissions sont réglées de telle sorte que le tiroir ferme d'autant plus l'orifice que la pression sous le piston est plus grande; l'appareil étant suffisamment sensible, on voit que la pression à l'aval de l'étranglement n'éprouvera que des variations très petites. On voit, d'autre part, que, grâce à la chute qui se produit au passage du détendeur, la pression et, par suite, la température peuvent beaucoup varier dans la chaudière, sans que le régime de l'écoulement à l'aval éprouve des perturbations notables. Dans une chaudière ordinaire, la masse d'eau est grande et les variations de température sont petites; ici, c'est l'inverse qui se produit : la régulation est obtenue comme avec un volant de faible poids, dont on augmenterait la puissance en lui imprimant une très grande vitesse.

Le régulateur détendeur comporte, lui aussi, des dispositifs fort ingénieux, dont nous renvoyons la description à une autre partie du présent travail.

2° La quantité d'eau contenue dans la chaudière étant très petite, il est absolument nécessaire que l'alimentation soit, à chaque instant, égale à la vaporisation et en suive exactement toutes les variations; faute de quoi la chaudière deviendrait rapidement, ou trop vide, ou trop pleine; ici encore un appareil automatique est indispensable. Voici comment l'alimentation est assurée :

Une pompe à vapeur sans volant est mise en relation avec la conduite de vapeur et refoule l'eau dans la chaudière; un orifice est ménagé sur le parcours de la conduite de refoulement et peut être obturé plus ou moins complètement par une petite soupape; lorsque la soupape est fermée, la pompe s'arrête; suivant que la soupape est plus ou moins levée, la vitesse de la pompe et, par conséquent, son débit augmentent ou diminuent dans la même proportion. Quant à la soupape, elle est gouvernée par un flotteur, qui suit les mouvements du plan d'eau dans la chaudière; lorsque le flotteur s'élève, l'alimentation diminue, et inversement; le plan d'eau ne peut donc varier que dans des limites très étroites.

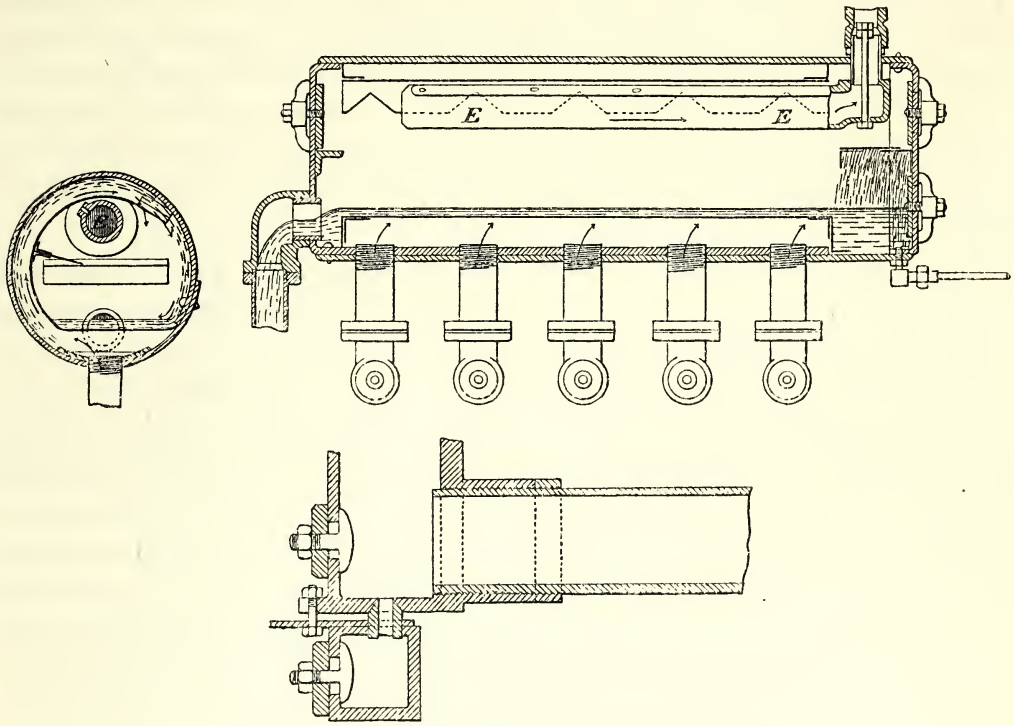
Nous parlons de plan d'eau pour simplifier le langage, mais en réalité le terme est impropre : la chaudière est remplie d'un mélange d'eau et de vapeur, dont la terminaison dans le haut n'est pas définie; placé dans ce fluide mixte, le flotteur fonctionnerait fort mal; c'est dans un récipient séparé *D* qu'il joue; ce récipient est disposé en dehors de la chaudière, il est mis en relation avec elle par deux tubes branchés dans le haut et dans le bas d'un élément; le liquide calme contenu dans ce récipient s'établit à une hauteur moyenne, qui est en relation avec la quantité existant à chaque instant dans la

chaudière; c'est ce niveau que l'on peut considérer comme le véritable plan d'eau. Ce récipient est d'ailleurs muni d'un tube de niveau *f*.

Enfin l'alimentation peut être réglée à la main par un robinet gradué *g*, qui sert d'adjuvant au jeu du flotteur.

3° Les éléments vaporisateurs émettent un mélange d'eau et de vapeur, et l'envoient dans le collecteur de vapeur. La capacité de ce récipient est beaucoup trop petite pour que la séparation du liquide ait le temps de s'y faire par simple décantation; l'assèchement de la vapeur s'obtient par des procédés particuliers.

Le collecteur de vapeur (fig. 42) est muni de chicanes, disposées de telle sorte que le fluide mixte qui s'échappe des vaporisateurs avec une grande vitesse soit obligé de



Assemblage du collecteur d'alimentation.

Fig. 42. — Collecteur épurateur.

tourbillonner; cette rotation produit une sorte d'essorage, les particules liquides, plus denses, s'éloignant plus rapidement du centre. La vapeur est ainsi dépouillée des masses d'eau qu'elle entraînait; elle ne tient plus en suspension qu'une poussière d'eau très fine, qu'elle véhicule dans tous ses mouvements. La prise de vapeur est faite par un tuyau *EE* percé, sur son arête supérieure, de quelques trous d'assez petit diamètre pour que l'écoulement se fasse à grande vitesse, c'est-à-dire sous une charge assez forte; cette vitesse, en s'amortissant brusquement, se change en chaleur, ce qui vaporise la petite quantité d'eau entraînée.

Enfin la vapeur presque entièrement desséchée parcourt encore les tuyaux placés au plafond du fourneau et constituant le sécheur.

4° L'eau de la chaudière, ainsi qu'on l'a vu, se renouvelle trois ou quatre fois par heure; les impuretés que contient l'eau d'alimentation restant dans la chaudière, le point de saturation est promptement atteint, et les précipités se produisent rapidement; il s'agit d'éviter qu'ils n'encombrent les tubes.

A cet effet, on a disposé, dans la chaudière même, un système d'épuration de l'eau; le traitement se fait par la chaleur, et il est efficace à cause de la température élevée qui règne dans la chaudière, laquelle travaille toujours sous haute pression. L'eau d'alimentation est lancée dans le collecteur de vapeur, où elle s'étale en lames minces, et prend immédiatement la température de la vapeur qui la baigne; les sels précipités par cette élévation de température restent en suspension; la circulation générale les entraîne, par la conduite verticale de retour *CC*, au récipient *F* appelé *déjecteur;* la section du déjecteur étant grande, la décantation s'y produit; les dépôts s'y réunissent dans le bas sous forme de boues, que l'on extrait de temps à autre à l'aide d'un robinet de purge, tandis que les eaux purifiées retournent au collecteur d'alimentation.

Nous avons insisté avec quelque détail sur les dispositifs spéciaux qui se présentent comme une conséquence forcée du principe même de la chaudière Belleville. C'est qu'en effet ces dispositifs ingénieux offrent à l'étude un intérêt de premier ordre; c'est que des difficultés considérables ont dû être vaincues pour en rendre le jeu sûr et pratique. Aussi longtemps que ces obstacles n'ont pas été surmontés, la chaudière dont il s'agit ne pouvait être considérée comme un appareil réellement industriel. Aujourd'hui la chaudière Belleville est entrée largement dans les usages, et elle rend les meilleurs services. Comme chaudière fixe, elle est particulièrement indiquée lorsque les locaux où elle doit être installée sont étroits, entourés d'habitations, ou bien lorsqu'ils sont d'un accès difficile, les éléments démontés de la chaudière étant transportables à dos de mulet. La marine a adopté cette chaudière pour un grand nombre d'embarcations et de navires. La maison Belleville a déjà installé plus de 2,000 générateurs fixes, et des générateurs marins représentant une puissance d'au moins 40,000 chevaux.

A l'Exposition figuraient deux batteries de chaudières Belleville en fonctionnement, savoir :

Une batterie de 6 chaudières, installée dans la cour de la force motrice, pour le service du palais des Machines, comportant une surface de chauffe totale de 1,100 mètres carrés, et fournissant moyennement 10,000 kilogrammes de vapeur à l'heure;

Une batterie de 700 chevaux, installée dans le pavillon de la Compagnie continentale Edison, et alimentant les machines de cette station d'électricité.

En outre, la maison Belleville exposait, comme chaudières froides :

Dans le pavillon de la navigation, sur la berge de la Seine, un des huit groupes de générateurs d'un croiseur de 8,000 chevaux;

Dans le palais des Machines, classe 52, divers types de générateurs fixes, locomobiles, etc.

Dans l'étude qu'on vient de lire des chaudières de l'Exposition, nous avons suivi autant que possible un ordre méthodique, en prenant pour base de classification la capacité des générateurs examinés. Nous avons débuté par les chaudières à grand volume, et nous en sommes arrivés à la chaudière Belleville, qui ne contient qu'une quantité d'eau extrêmement restreinte.

Faisons un pas de plus, nous trouvons à l'Exposition un système de générateurs d'une capacité bien plus faible encore, puisque le volume intérieur est pour ainsi dire réduit à zéro; il est présenté par MM. Serpollet frères, de Paris. Le but que les inventeurs se sont proposé, c'est de supprimer complètement toute réserve d'eau, de transformer instantanément l'eau en vapeur, qui passe immédiatement dans la machine sans séjourner dans la chaudière.

La pièce principale de l'appareil (fig. 43) est un tube d'acier *A*; ce tube, très épais, a été au préalable aplati au laminoir, de telle sorte que le vide intérieur soit réduit à une fente d'épaisseur insignifiante, quelques centièmes de millimètre. Ce tube, enroulé en spirale, est placé dans les flammes d'un foyer; il est mis, par un bout, en communication avec la pompe alimentaire et, par l'autre bout, avec la machine motrice.

Dans les premiers essais, on avait supprimé toute distribution de vapeur : chaque coup de piston de la pompe alimentaire déterminait une excursion du piston moteur. Cette disposition, très simple en théorie, n'a pas été maintenue. Dans les types qui figuraient à l'Exposition, la machine à vapeur est complète. Le tube, même chauffé au rouge, peut résister à des pressions énormes; le volume intérieur de l'appareil est de quelques centimètres cubes; aucun danger d'explosion n'est donc à craindre; par conséquent, on a pu supprimer tous les organes de sûreté, qui sont si incommodes, surtout lorsqu'il s'agit de petites chaudières

L'ensemble du moteur est donc constitué par le tube vaporisateur, plongé dans son foyer, par la machine motrice et la pompe alimentaire.

Pour mettre en marche, il suffit, après avoir chauffé le tube, d'actionner à la main la pompe alimentaire : la machine se met à tourner; on embraye alors la pompe, et le mouvement se continue. C'est par l'alimentation qu'est réglée la vitesse. A cet effet, le pendule conique est relié à la pompe alimentaire, dont il commande le débit, soit à l'aide d'une coulisse modifiant la course du piston de pompe, soit par l'ouverture d'une soupape laissant échapper une partie de l'eau refoulée. Quand la machine tend à s'emporter, l'alimentation se trouve réduite; il en est donc de même du travail moteur; en cas de ralentissement, les effets inverses se produisent; c'est par ces procédés que l'allure de la machine se trouve maintenue entre des limites rapprochées.

Dans les générateurs ordinaires, c'est l'eau qui emmagasine et restitue successivement la chaleur, suivant que la production ou la consommation sont prépondérantes;

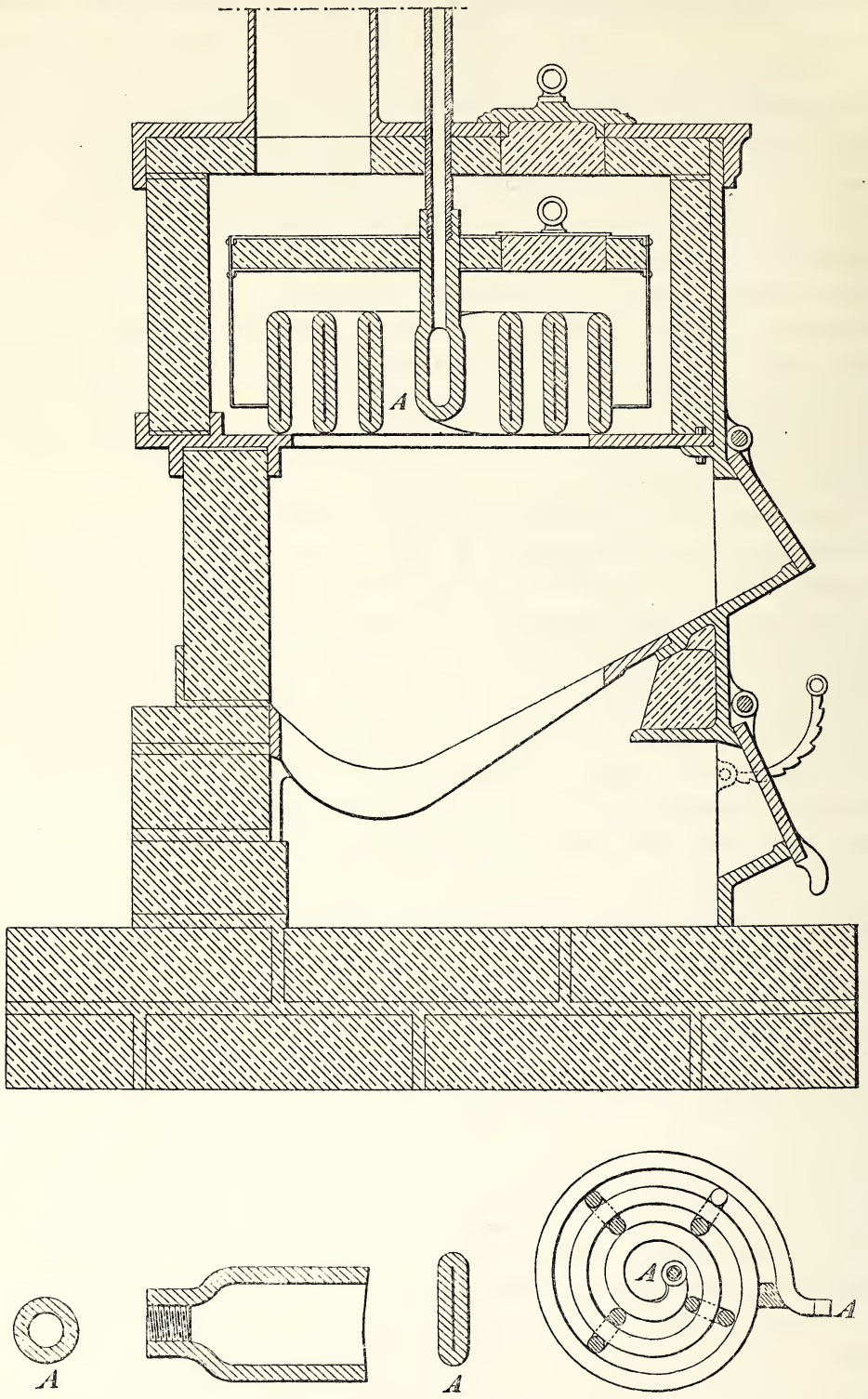


Fig. 43. — Chaudière Serpollet frères.

ici il n'en est pas de même, c'est le métal qui joue le rôle de volant de chaleur; c'est cette raison, aussi bien que celle de la résistance à la pression, qui a conduit à donner aux parois une forte épaisseur.

On a essayé divers procédés de fabrication pour les tubes : on les a faits en cuivre cannelé, en acier revêtu de fonte; jusqu'ici le simple tube en acier doux, laminé au rouge, semble avoir le mieux réussi. Quoique fort mince, la fente intérieure ne s'obstrue pas par les dépôts; les précipités abandonnés par l'eau sont entraînés, à l'état de poudre impalpable, par le courant très rapide qui parcourt le tube à chaque coup de piston.

La chaudière Serpollet possède, on le voit, certaines qualités qui lui sont absolument spéciales; sans avoir besoin d'aucun organe de sûreté, elle ne présente aucun danger; la conduite en est on ne peut plus simple et ne nécessite pas des soins assidus; enfin elle est légère et occupe peu de place. Elle semble convenir tout particulièrement pour les très petites forces; c'est la chaudière de ménage.

A l'Exposition, MM. Serpollet présentaient un certain nombre d'applications de leur invention; ils avaient sur la berge un pavillon où de petits moteurs étaient en service; on y voyait des appareils actionnant divers outils, notamment une petite pompe centrifuge et une dynamo; cette dernière machine envoyait le courant à des lampes à incandescence, dont la fixité démontrait clairement la parfaite régularité d'allure du moteur. Mais c'est principalement pour les petits appareils locomoteurs que les qualités du système semblent précieuses; l'exposition Serpollet comprenait de jolis moteurs pour canot de plaisance, mais surtout des tricycles à vapeur, fort réussis comme dispositions générales et d'une commodité d'emploi remarquable. Quelques-uns de ces appareils ont déjà exécuté de longs voyages.

Le moteur Serpollet en est à ses débuts; il en est encore à faire ses preuves comme applications pratiques; l'idée est originale, éminemment ingénieuse; elle paraît féconde et susceptible de donner des résultats utiles.

SECTION III.

ACCESSOIRES DE CHAUDIERES.

SOMMAIRE.

Objet et division.

Appareils de sûreté. — Appareils automatiques et appareils indicateurs. — Nomenclature des principaux appareils de sûreté.

Manomètres. — Tube Bourdon. — Exposition de E. Bourdon : manomètres pour hautes pressions; procédés d'étalonnage; manomètres enregistreurs. — Manomètres de Ducomet, de Guichard, de Bisson et Cie, de Devaux et Daclin, de Crosby, de Richard.

Soupapes de sûreté. — Du rôle de la soupape de sûreté. — Soupape incalable de Coret. — Soupapes à grande levée d'Adams, de Dulac, de Wilson. — Joint Brouillet.

Tubes de niveau. — Tubes Moncrieff. — Coupe-tubes de Ducomet. — Indicateur de Vaultier, de Gautreau.

Flotteurs. — Flotteurs de Dupuch, de Carette, de Chaudré. — Indicateur de Dulac. — Autres indicateurs.

Robinetterie pour vapeur. — Exposition de Muller et Roger, de Martel et Bousselet, de E. Bourdon, de Dupuch, de Lehmann, de Colombier. — Robinet-valve de Pile. — Peet-valve. — Robinets-vannes de Véry, de Dupuch.

Clapets de retenue d'alimentation.

Canalisations de vapeur.

Joints de vapeur. — Joint de de Naeyer, de Legat. — Produits d'asbeste d'Albasini, d'Allard, de la Société de Tarascon, de l'United Asbestos Co.

Calorifuges. — Feutre de Mme Lion. — Amiante. — Laine de scorie de Muller. — Liège.

Injecteurs. — Injecteurs de Guyenet, de Vabe, de Thiry et Chantrenne-Soiron, de Cuau.

Réchauffeurs d'alimentation.

Anti-incrustants. — Décanteurs de Wilson et Roake, de Smith, de Dulac. — Épurateurs de Gaillet, de Dervaux, de Desrumeaux, de Howatson.

Régulateur de pression de Belleville.

Régulateurs d'alimentation de Belleville, de Cleuet.

Détendeurs de vapeur de Legat, de Lencauchez, de Francq, de Deniau.

Purgeurs automatiques de Legat, de Cleuet, de Véry.

Clapets automatiques pour vapeur. — Trois types. — Conditions à remplir. — Clapets de Francq et Mesnard, de Pasquier, de Colombier, de Fontaine, de Carette, de Pile, de Labeyrie.

Appareils divers. — Déjecteur de Lencauchez. — Vidangeur de Péret. — Écouvillons de Dumas-Gardeux, de Beffa.

Nous étudierons, dans la présente section, en premier lieu, les appareils de sûreté des chaudières, puis les organes des canalisations de vapeur, et enfin certains appareils auxquels on a recours dans des applications spéciales.

Les appareils de sûreté ont pour objet d'éviter les accidents auxquels sont exposées les chaudières, et en particulier les explosions. La rupture de la paroi d'une chaudière a lieu nécessairement chaque fois que la résistance de cette paroi devient inférieure à l'effort qui tend à la rompre; une chaudière, primitivement solide et en bon état, peut se déchirer, soit par suite d'un excès de pression, soit par l'effet d'une diminution dans la résistance du métal. C'est en vue de parer à ces deux causes d'accidents que sont établis les appareils de sûreté. Ils se divisent donc en deux grandes classes, savoir :

Les appareils ayant pour objet de limiter l'élévation de la pression;

Les appareils destinés à prévenir la diminution de résistance de la paroi.

Certains de ces appareils sont *automatiques :* ils entrent en jeu d'eux-mêmes, sans

nécessiter l'intervention du chauffeur, aussitôt que l'action qu'il s'agit de prévenir commence à se manifester, et donnent naissance à des actions opposées, qui arrêtent la production des effets dangereux. D'autres appareils sont simplement *indicateurs*, c'est-à-dire qu'ils révèlent au dehors la marche des phénomènes que l'on a intérêt à surveiller et avertissent le chauffeur, lequel doit manœuvrer en conséquence de ces indications. Les appareils du premier genre semblent, au premier coup d'œil, plus satisfaisants, en ce sens que l'attention du chauffeur n'a pas besoin d'être aussi assidue, et que la sécurité n'est pas à la merci d'une négligence ou d'un oubli. Néanmoins, l'expérience n'a pas sanctionné ces prévisions; en matière de générateurs, les appareils de sûreté automatiques n'ont pas réalisé ce qu'on en attendait; ils ont eu des ratés et ont donné lieu à des accidents. Des ingénieurs fort compétents estiment que la sécurité que paraissent procurer ces appareils est trompeuse; qu'au fond, elle atténue la responsabilité du chauffeur et endort sa surveillance, dont il n'est possible dans aucun cas de se passer. L'automaticité avait été à peu près laissée de côté.

Toutefois des faits nouveaux, résultant de circonstances nouvelles, sont venus, depuis quelques années, soulever les doutes et atténuer ce que ce jugement avait peut-être de trop absolu. Certaines chaudières de très petit volume, ainsi qu'on l'a vu, sont tellement sensibles aux moindres variations d'allure, tellement promptes à franchir les limites du régime régulier, que l'attention la plus soutenue ne saurait réprimer ces écarts; il a donc fallu, de toute nécessité, revenir à l'automatisme. Ce n'est pas sans de grandes difficultés qu'on est parvenu à établir des appareils de sûreté sur l'automatisme desquels on pût compter; mais, en fin de compte, le problème est à peu près résolu, en ce sens que les ratés sont très rares, que les chaudières à petits éléments ont cessé d'être dangereuses, et que leur conduite n'exige pas une attention qui dépasse ce qu'un bon chauffeur peut donner couramment.

Le procès a donc besoin d'être revisé; on ne peut plus admettre comme démontré que l'automaticité des appareils de sûreté soit, par elle-même et absolument, une source d'accidents; toutefois la solution n'est pas définitive et demande à être mûrie.

Dans tous les pays industriels, des règlements de police relatifs aux générateurs de vapeur prescrivent l'application d'appareils de sûreté; ces prescriptions, sans être absolument uniformes d'un pays à l'autre, se ressemblent partout dans leurs lignes essentielles.

En France, les dispositifs administratifs ont en somme assez peu varié; toutefois, depuis l'Exposition de 1878, de nouveaux décrets ont été promulgués, qui diffèrent par plus d'un point des règlements antérieurs. Nous aurons soin, en étudiant chacun des appareils, de faire ressortir les innovations introduites par les réglementations récentes.

Revenons à la division de notre sujet.

La première catégorie des appareils de sûreté comprend ceux de ces appareils qui

ont pour objet de réprimer la surélévation de la pression. Parmi les appareils en usage, il y en a deux qui se trouvent sur tous les générateurs et qui sont d'ailleurs imposés par tous les règlements; ce sont : le *manomètre* et la *soupape de sûreté.*

Le manomètre est purement avertisseur; il indique à chaque instant au chauffeur la pression qui règne à l'intérieur de la chaudière.

La soupape de sûreté a pour mission de laisser échapper la vapeur dès que la pression limite est dépassée; c'est donc, en principe, un appareil automatique; mais, d'après les règlements en vigueur en France, la fonction de cet organe a sensiblement dévié de son caractère primitif; il est devenu, sinon absolument, au moins partiellement avertisseur.

En dehors du manomètre et de la soupape de sûreté, on a proposé divers appareils destinés à prévenir l'exagération de la pression; nous en décrirons quelques-uns.

La paroi d'une chaudière peut perdre sa résistance sous l'action de causes très nombreuses et très variées; certaines de ces causes agissent avec lenteur et se manifestent par des symptômes appréciables, avant que leurs effets deviennent dangereux; d'autres au contraire agissent dans un temps relativement court et ne préviennent pas.

Parmi ces dernières, il faut compter, en premier lieu, l'élévation de température de la paroi. Lorsque la tôle vient à rougir, elle perd, pour ainsi dire, toute sa ténacité, et la rupture devient imminente, même à la pression normale de marche. Or cet échauffement du métal peut se produire toutes les fois que l'eau cesse de refroidir par son contact la paroi de la chaudière. C'est, dans beaucoup de cas, par un abaissement exagéré du plan d'eau que cet accident est amené. Aussi les règlements entourent-ils de précautions sévères le maintien du plan d'eau à un niveau déterminé et choisi de telle sorte, que la portion de la paroi située au-dessus de ce plan ne soit en aucun cas exposée à rougir.

Les appareils destinés à prévenir l'abaissement du plan d'eau se rangent en trois catégories :

Les *indicateurs de niveau;* ce sont en général des appareils avertisseurs; toutefois certaines chaudières sont munies d'organes qui laissent échapper la vapeur dès que le plan d'eau vient à s'abaisser d'une manière dangereuse;

Les *clapets de retenue,* empêchant la vidange accidentelle de la chaudière par le tuyau d'alimentation;

Enfin les *appareils d'alimentation;* ils sont le plus souvent actionnés par la machine motrice ou par une machine spéciale; en ce cas, ils cessent de faire partie de la chaudière, et nous en renverrons l'étude à d'autres chapitres du présent rapport; nous n'étudierons, dans la présente section, que les *injecteurs* et leurs variétés, ainsi que les *bouteilles* et analogues. Le plus souvent les appareils alimentaires ne sont pas automatiques; on a cependant essayé, à plus d'une reprise, de les placer sous la dépendance du plan d'eau dans la chaudière; ces tentatives, si séduisantes en principe, avaient échoué, jusqu'au jour où, pour l'usage des chaudières à petit volume, il est devenu

indispensable de résoudre le problème; la solution peut être aujourd'hui considérée comme acquise pour cette application spéciale.

Indépendamment de l'abaissement du plan d'eau, il peut se produire, dans certains cas, un échauffement violent de la paroi dans le voisinage du foyer; c'est le phénomène connu sous le nom de *coup de feu,* et nous avons déjà eu l'occasion d'en dire quelques mots. Ce n'est pas à l'aide d'appareils spéciaux que l'on peut prévenir la production des coups de feu, mais par des précautions générales, rentrant dans l'ordre de celles que nous allons définir.

Une chaudière s'use, comme tout appareil industriel; elle est exposée à des corrosions, à des dépôts calcaires ou gras; ces causes ont parfois amené les plus graves accidents; en général, on peut les prévenir par un entretien soigné, par un choix ou un traitement convenable des eaux alimentaires, mais surtout par des nettoyages suffisamment fréquents et par des visites convenablement faites. Toute chaudière doit donc être munie d'organes propres à permettre l'entrée des agents chargés de l'inspection; ce sont les appareils de *vidange,* de *visite* et de *nettoyage.* Ces appareils, sans être prescrits expressément par les règlements, sont prévus d'une manière implicite dans les dispositifs qui imposent un entretien soigné et des visites régulières.

En dehors des générateurs proprement dits, il faut compter comme des accessoires de la production de la vapeur, d'une part, les *canalisations de vapeur,* avec les nombreux appareils qui se greffent sur les conduites, tels que *robinets, valves, purgeurs, détendeurs,* etc., d'autre part, les dispositifs divers ayant pour objet, soit d'atténuer la déperdition de chaleur, soit d'éviter la formation de dépôts incrustants.

Nous venons d'énumérer et de classer les principaux sujets qui seront traités dans la présente section. Nous allons tout de suite entrer en matière par l'étude des *manomètres.*

Dans les appareils à vapeur d'eau, on ne fait plus guère usage aujourd'hui que du manomètre métallique. Bien que l'on retrouvât, à l'Exposition, les différents systèmes de manomètres déjà connus, il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que les manomètres à tube métallique élastique sont les plus employés pour tous les usages. Ce système porte le nom de Bourdon; il a été inventé, en 1849, par Eugène Bourdon, l'éminent ingénieur auquel l'industrie est redevable de si utiles et si nombreuses découvertes.

L'élément essentiel du manomètre Bourdon est, comme on sait, un tube élastique à section méplate, recourbé en forme d'arc de cercle ou d'hélice; un pareil tube jouit de cette propriété, qu'il s'étend et se redresse lorsque augmente la pression du fluide qu'il renferme; dans des limites assez étendues, ces déformations sont élastiques, c'est-à-dire que, pour une pression donnée, la forme du tube est toujours la même. D'autres systèmes ont été proposés et pratiqués pour remplir le même objet, tous fondés sur le même principe, à savoir, la déformation élastique d'une enveloppe; mais le tube

IMPRIMERIE NATIONALE.

Bourdon présente seul cet avantage, que ses déformations donnent lieu à des mouvements d'une assez grande amplitude, pour que la transmission à l'index qui doit traduire aux yeux ces mouvements soit de la plus grande simplicité.

Depuis l'Exposition de 1878, les usages du manomètre métallique se sont beaucoup développés, et les applications de cet instrument sont devenues fort nombreuses et variées. Pour ce qui concerne les chaudières à vapeur, le nombre des manomètres, obligatoires sur ces appareils, s'est augmenté en même temps que celui des générateurs. En outre, la généralisation de la détente par échelons dans les machines à vapeur a motivé l'installation de manomètres combinés, indiquant le vide et la pression. Enfin l'usage des fluides sous pression a pris, dans ces dernières années, une extension considérable; citons au hasard : les transmissions hydrauliques, les freins continus des chemins de fer, l'éclairage des wagons au gaz comprimé, les canalisations d'air sous pression, la compression de l'oxygène, de l'acide carbonique, la fabrication de la glace, etc. Toutes ces industries, la plupart entièrement nouvelles, d'autres à peine à leurs débuts il y a peu d'années, ont développé dans de larges proportions les usages des manomètres. Mais ce n'est pas tout; dans presque toutes ces applications, les pressions autrefois usitées sont largement dépassées; des pressions de 50, de 100 atmosphères et au delà n'ont plus rien d'exceptionnel; on a même établi des appareils de compression atteignant plus de 1,000 atmosphères. Pour se prêter à ces conditions nouvelles, la fabrication des manomètres a dû elle-même se transformer; il a fallu recourir à de nouvelles matières, modifier les méthodes de mise en œuvre et de construction; et tout ce travail n'a pu se faire sans de nombreuses et difficiles recherches.

L'exposition des manomètres présente donc un intérêt tout particulier, et mérite d'être étudiée avec quelque détail.

En tête des ateliers qui construisent des manomètres, se place l'ancienne et célèbre maison Bourdon, dirigée, depuis 1872, par M. Édouard Bourdon, le fils de l'illustre inventeur du manomètre métallique. Cette maison est restée à la hauteur de sa réputation, et son exposition présentait un très vif intérêt. Outre une collection très complète de manomètres ordinaires, construits et gradués avec tout le soin qu'on est habitué à rencontrer dans les produits de la maison Bourdon, cette exposition comportait, comme objets particulièrement remarquables, une série de manomètres pour les pressions élevées.

Le laiton est le métal ordinairement employé pour la fabrication des tubes flexibles; il se comporte bien jusqu'à des pressions de 8 ou 10 kilogrammes. Au delà, sa résistance et son élasticité cessent d'être suffisantes. L'acier possède ces deux qualités, mais il a un grand défaut, c'est qu'il s'oxyde facilement; or, quand on l'emploie en tubes minces (ceux des manomètres ont de 2/10 à 8/10 de millimètre d'épaisseur), la moindre oxydation, modifiant cette épaisseur, fausse les indications. S'il s'agit de

manomètres pour presses hydrauliques, les tubes sont plus épais (1 à 3 millimètres) et peuvent être remplis de glycérine ou d'huile, qui empêchent l'oxydation; dans ce cas, l'acier atteint bien le but. Mais pour les autres applications il n'en est plus de même. Il était important de trouver, pour la fabrication des tubes, un métal possédant des propriétés analogues à celles de l'acier, mais ne s'oxydant pas. A la suite de nombreuses recherches, M. Bourdon a fini par mettre la main sur un bronze phosphoreux, qui semble satisfaire à toutes les conditions requises; ce métal est inoxydable; convenablement préparé et étiré au banc, il donne des tubes parfaitement élastiques et dont la résistance à la traction atteint 75 kilogrammes par millimètre carré.

Lorsqu'un manomètre est établi avec des soins convenables, les déformations de l'organe élastique sont à peu près proportionnelles aux pressions; toutefois la graduation ne saurait être établie à l'avance par le calcul, elle ne peut être faite qu'empiriquement et par comparaison. Dans certains ateliers, on se sert, à cet effet, de manomètres étalons, que l'on vérifie de temps à autre les uns par les autres. On comprend tout ce qu'un pareil procédé a d'incertain : au bout de quelques années, par suite des changements inévitables qui se produisent dans la texture et l'élasticité du métal, les divers étalons finissent par diverger, et on ne peut les ramener à l'uniformité que par des corrections arbitraires. Dans une fabrique de manomètres, on ne saurait se passer de moyens de contrôle, établis sur des données absolument fixes et certaines, non plus que de procédés rapides et précis pour faire les comparaisons.

A ce point de vue, l'outillage établi par la maison Bourdon est des plus remarquables. Les étalons sont contrôlés à l'aide d'un manomètre à mercure et à air libre, dont la colonne graduée a 13 mètres de hauteur, permettant de mesurer directement des pressions de 17 kilogrammes. Pour établir et régler les pressions, on dispose de petits compresseurs spéciaux, dont la manœuvre est à la fois très simple et très précise. Ces compresseurs se composent d'un piston de presse hydraulique, que l'on manœuvre à la main au moyen d'une vis; à l'aide de cet instrument, on peut graduer les pressions avec une précision parfaite. Quant aux manomètres à livrer au commerce, leur graduation se fait par comparaison avec les étalons, en les montant sur une conduite générale, alimentée d'eau comprimée par des pompes foulantes, et dont on fait à volonté varier la pression à l'aide de simples robinets à vis.

Ces dispositifs conviennent parfaitement tant qu'il ne s'agit que de pressions ordinaires, ne dépassant pas 15 ou 18 kilogrammes; mais ces limites sont largement franchies aujourd'hui, et la graduation des manomètres pour les pressions élevées exige des dispositions spéciales.

M. Bourdon père avait résolu ce difficile problème de mesurer exactement des pressions de plusieurs centaines d'atmosphères. L'appareil qu'il avait imaginé à cet effet a été reconstruit et perfectionné par M. Édouard Bourdon; il figurait à l'Exposition de 1889. On le trouvera représenté dans la figure 44 ci-jointe. Le principe est très simple : il consiste à faire agir la pression à mesurer sur un petit piston plongeur *A*

de diamètre exactement déterminé; sur la tête de ce piston est appliquée une force qui fait exactement équilibre à la résultante des pressions; cette force est obtenue au moyen d'une romaine à leviers *BB*, *CC*. Réduit à ces organes, l'appareil eût manqué de sensibilité, à cause du frottement dû à la pression du cuir embouti formant le joint autour du piston. Le procédé imaginé par M. Eugène Bourdon pour annuler l'influence de ce frottement est d'une ingéniosité admirable. A l'aide de la manivelle *D* et de l'engre-

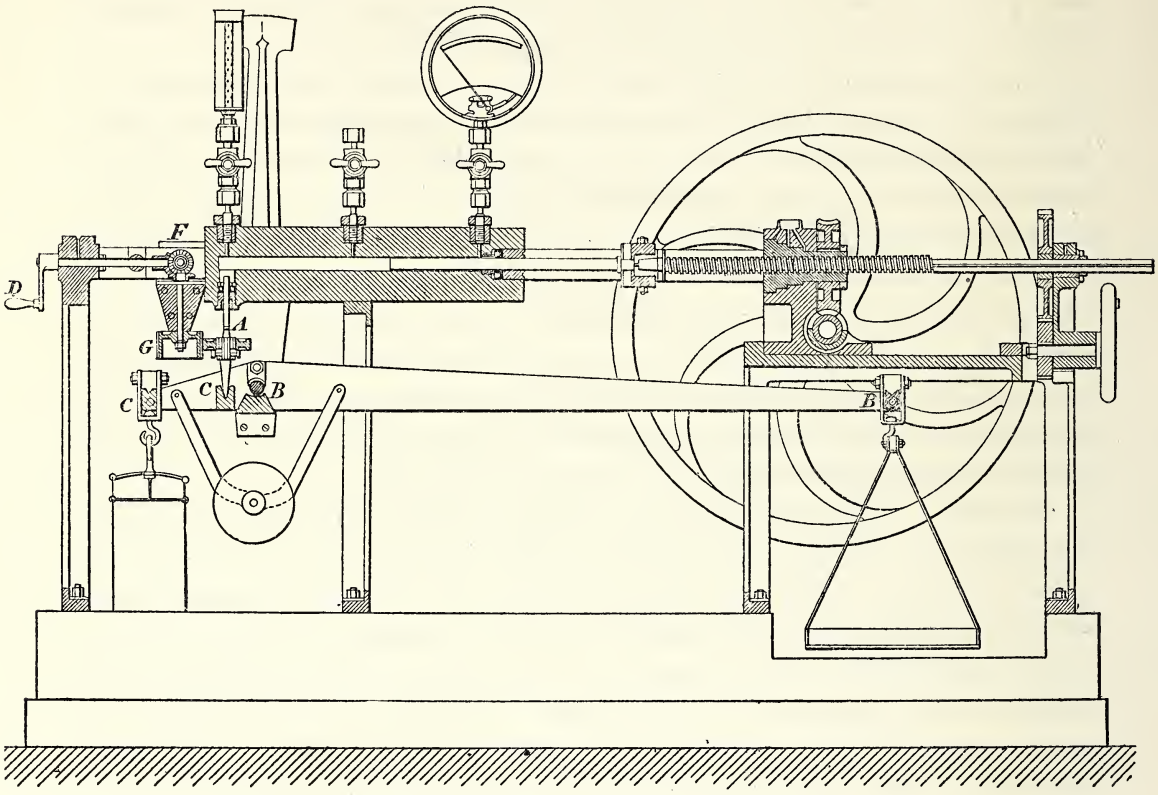


Fig. 44. — Balance pour la graduation des manomètres à haute pression.

nage *FG*, on imprime au piston un mouvement rapide de rotation autour de son axe; la résistance due au frottement étant dirigée en sens inverse du mouvement relatif des pièces frottantes, on voit que la composante de cette force parallèle à l'axe du piston se trouvera, pour ainsi dire, annulée.

L'effet produit par cette manœuvre ingénieuse est des plus curieux : tant que l'engrenage est immobile, les mouvements de la romaine sont durs et paresseux; dès que l'on met en jeu l'appareil de rotation, le fléau se met à osciller librement comme dans une balance très sensible. L'usage de cet appareil est singulièrement facilité par l'adjonction d'un petit compresseur à main (fig. 45), analogue à celui que nous avons déjà décrit; seulement, afin d'atteindre sans effort les hautes pressions, l'instrument a

été pourvu d'un piston différentiel à deux diamètres très voisins, de telle sorte qu'un mouvement notable du plongeur ne déplace qu'un fort petit volume de liquide.

L'appareil de tarage présenté à l'Exposition permettait de mesurer facilement et sûrement des pressions de 1,500 atmosphères; celui qui est en service dans les ateliers de M. Bourdon est plus puissant et fournit des données exactes jusqu'aux pressions

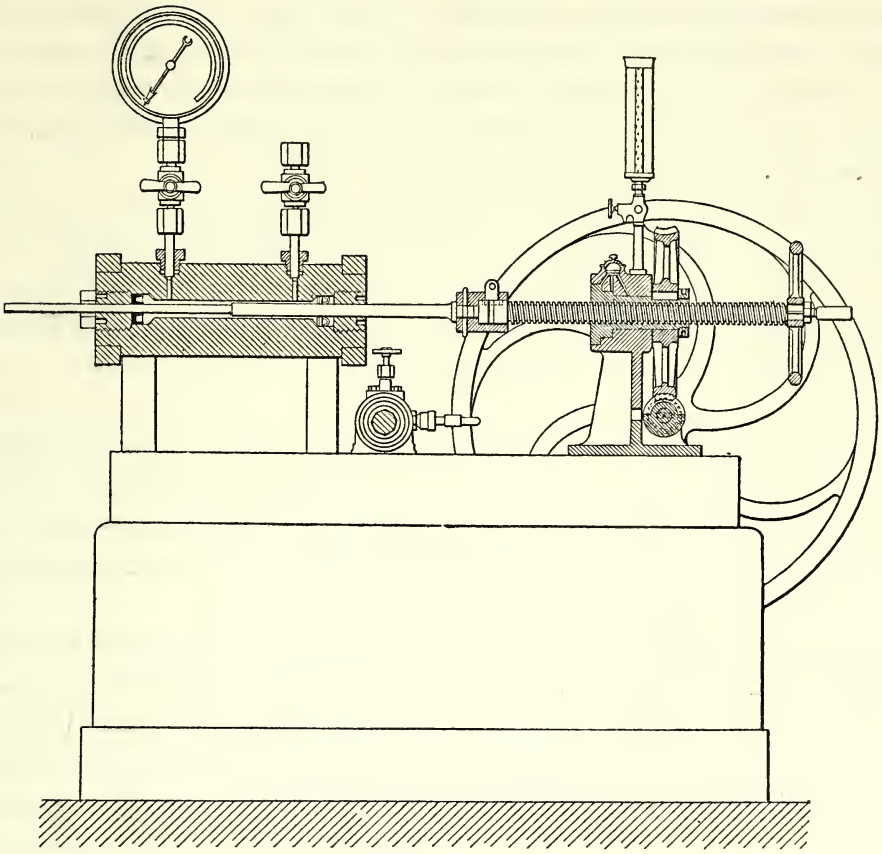


Fig. 45. — Compresseur hydraulique pour la graduation des manomètres.

de 3,000 kilogrammes par centimètre carré, pressions comparables à celles qui se développent dans l'âme des pièces d'artillerie.

Nous ne décrirons pas en détail les divers manomètres exposés par la maison Bourdon; disons un mot seulement des manomètres enregistreurs.

Depuis quelques années on s'est appliqué à contrôler autant que possible les opérations industrielles. Un contrôle exact et permanent est la meilleure garantie de la régularité et de l'économie de la fabrication. Mieux que tous autres, les appareils enregistreurs satisfont aux diverses conditions du contrôle. Les manomètres enregistreurs laissent sur un papier la trace de toutes les variations qu'a pu subir la pression dans l'appareil auquel ils sont adaptés, c'est-à-dire l'histoire complète du travail du chauf-

feur, de ses négligences, de ses inattentions. Il n'est pas besoin d'insister sur les services que peuvent rendre de pareils instruments, tant au point de vue de l'économie dans l'emploi et la production de la vapeur, qu'à celui, bien plus sérieux encore, de la sécurité. Aussi se sont-ils rapidement propagés dans l'industrie. Les générateurs de l'Exposition étaient munis de ces appareils, et les tracés ainsi obtenus ont été recueillis dans les archives du Service mécanique.

Dans le manomètre enregistreur Bourdon, les inscriptions sont faites sur un disque en papier, convenablement divisé et fixé sur un plateau qui fait un tour en vingt-quatre heures; la plume, chargée d'encre d'aniline, qui laisse sa trace sur ce papier, est conduite par l'aiguille du manomètre dont le système d'enregistrement fait partie. L'ensemble est simple, solide, facile à l'usage.

La fabrication de la maison Bourdon est des plus remarquables; elle est si universellement appréciée, que les commandes affluent, non seulement de la France, mais encore des pays étrangers et notamment de la Grande-Bretagne, dont l'industrie est pourtant si jalouse et, surtout en ce qui concerne la mécanique, si défiante à l'égard des produits fabriqués en dehors de son territoire.

En dehors de la maison Bourdon, d'autres ateliers exposent de fort bons manomètres; citons entre autres M. J. Ducomet, MM. Guichard, Bisson et Cie, MM. Muller et Roger, Richard frères, de Paris, MM. Devaux et Daclin (ancienne maison Dedieu), de Lyon, etc., et, dans les sections étrangères, l'exposition fort belle de la Crosby Steam Gauge and Valve C^o^, de Boston (Mass.).

Comme on l'a vu précédemment, l'organe déformable que l'on préfère est en général le tube Bourdon. D'autres systèmes sont encore en usage. Ainsi M. Ducomet se sert d'une capsule en cuivre mince, plaquée d'argent sur ses deux faces et recevant à l'intérieur la pression; un ressort contrebute la poussée, et les déformations sont amplifiées à l'aide de leviers. MM. Guichard, Bisson et Cie emploient, dans quelques-uns de leurs manomètres, la membrane ondulée, inventée par le fondateur de la maison, Lucien Vidie, et qui s'applique dans la construction des baromètres métalliques.

Plusieurs constructeurs présentent également des baromètres enregistreurs; l'enregistrement se fait le plus souvent sur une bande de papier enroulée sur un cylindre (MM. Richard frères), mû par un mouvement d'horlogerie; le tracé est fait par une plume spéciale, portée à l'extrémité du levier amplificateur des déformations de l'organe élastique; cette plume se meut dans un plan tangent au cylindre; comme elle décrit, non pas une ligne droite, mais un arc de cercle, il en résulte que l'enregistrement s'effectue suivant un système particulier de coordonnées : les abscisses sont proportionnelles aux temps, les ordonnées se comptent sur des arcs de cercle; la solution pratique est obtenue à l'aide d'un quadrillage spécial du papier enregistreur; parallèlement à sa rive, ce papier reçoit des lignes horizontales représentatives des pressions; dans le sens perpendiculaire sont tracés des arcs de cercle, de rayon égal à celui du levier

amplificateur, et figurant les heures et fractions d'heure à une échelle convenable. Le cylindre fait un tour en une semaine.

Arrivons à la soupape de sûreté. Cet appareil vénérable est antérieur même à la chaudière à vapeur, puisqu'il a été inventé par Denys Papin et appliqué par son illustre auteur à son digesteur. Papin l'avait constitué sous forme d'un simple disque horizontal, reposant par ses bords sur un siège plat bien ajusté, recevant en dessous la pression de la vapeur et en dessus l'effort dû à un poids porté au bout d'un levier; dès que la pression devient prépondérante, la soupape se soulève et la vapeur s'échappe.

L'antique disposition donnée par Papin à la soupape de sûreté a été conservée jusqu'à nos jours; c'est sous cette forme classique que se construisent aujourd'hui la plupart des soupapes appliquées aux générateurs fixes; pour les chaudières mobiles, on substitue en général aux poids des ressorts, moins sensibles aux trépidations en vertu de leur faible inertie.

La soupape de sûreté, avons-nous dit, se soulève aussitôt que la pression limite résultant de la charge qui pèse sur elle est dépassée; à partir de ce moment, la vapeur s'échappe de la chaudière; en principe, l'appareil est donc automatique, il limite de lui-même la pression. Telle est l'idée qui a prévalu pendant fort longtemps et qui a présidé, jusqu'en ces derniers temps, à l'installation de toutes les soupapes de sûreté.

Toutefois la question est moins simple qu'elle ne paraît au premier abord. En premier lieu, l'aire sur laquelle s'exerce la pression de la vapeur n'est pas exactement connue; sur tout son pourtour, la soupape est en contact avec son siège par une zone d'une certaine largeur; la pression transmise à cette aire de portage est mal définie et dépend de détails infiniment petits d'ajustage et d'entretien; de sorte que l'on n'est jamais sûr que, pour une soupape donnée, la levée aura lieu invariablement à une pression déterminée et toujours la même. Aussi, dans le but d'atténuer cette incertitude, les anciens règlements avaient-ils réduit autant que possible la largeur de la zone de portage. Mais c'est là l'un des côtés secondaires de la question.

Dès que la soupape s'est soulevée, l'évacuation se produit par l'orifice annulaire qui s'est ouvert entre le pourtour du siège et celui de la soupape; l'écoulement ne peut se faire qu'en vertu d'une perte de charge dans le fluide en mouvement; la pression moyenne qui agit en dessous du disque mobile est donc inférieure à celle qui règne dans la chaudière, et l'écart s'augmente en même temps que la hauteur de la levée; mais comme la charge de la soupape reste constante, il en résulte que la pression dans la chaudière dépasse la pression qui a déterminé le premier mouvement de levée; si la production de vapeur est très abondante et qu'elle ne trouve pas d'autre issue que la soupape, il peut se produire des surpressions notables, qui, dans la pratique, atteignent 1 kilogramme par centimètre carré et même davantage.

En définitive, on voit que la soupape de sûreté, telle qu'on la construit d'ordinaire, est bien un appareil automatique, en ce sens qu'elle limite la pression; mais cette pres-

sion limite n'est pas celle à laquelle la levée commence. Si, pour une chaudière donnée, on voulait s'imposer cette condition, que la soupape empêchât automatiquement la pression de dépasser une valeur déterminée, par exemple celle indiquée par le timbre, il serait possible d'y parvenir; il suffirait que la charge pesant sur la soupape fût telle, que la levée se fît un peu au-dessous de la pression du timbre; il faudrait, en outre, que les dimensions de l'appareil fussent assez grandes, pour que la soupape donnât écoulement à toute la vapeur que pourrait produire la chaudière en toute circonstance, moyennant une légère surpression au-dessus de la pression à laquelle se produit la levée.

Dans les anciens règlements, la soupape de sûreté était considérée comme un appareil absolument automatique; les dimensions qu'on devait lui donner pour qu'elle remplît complètement cet objet étaient rigoureusement déterminées. Les bases de ces déterminations étaient loin d'être exactes, mais en somme, comme elles pêchaient par excès plutôt que par défaut, le but était convenablement atteint.

Le décret du 30 avril 1880[1], actuellement en vigueur, a complètement rompu avec cette tradition; aux termes de ce décret, l'évacuation de la vapeur produite en excès a lieu par l'effet d'une manœuvre : le chauffeur intervient pour *décharger* ou *soulever* la soupape; dès lors l'appareil cesse d'être automatique, il indique l'instant où la pression atteint la limite fixée, et cette indication est fournie principalement par le bruissement que fait entendre la vapeur qui s'échappe; le chauffeur ainsi prévenu doit manœuvrer en conséquence. Les mêmes dispositions se retrouvent dans le décret du 9 avril 1883, relatif aux bateaux à vapeur qui naviguent sur les fleuves et rivières.

Cette innovation est peut-être le fait le plus important qui se soit manifesté depuis l'Exposition de 1878, en matière de soupapes de sûreté; c'est pour cette raison que nous avons cru devoir y insister. Hâtons-nous d'ajouter que, en dépit de ces textes formels, les idées ne sont pas encore parfaitement arrêtées sur cette matière délicate; dans le monde des ingénieurs et même dans quelques dispositions administratives, on constate certaines tendances à restituer à la soupape de sûreté son rôle primitif d'appareil automatique.

En ce qui concerne les soupapes de sûreté qui figuraient à l'Exposition, nous avons peu de dispositifs bien nouveaux à signaler.

M. Coret (T.), de Bourges, s'est préoccupé d'enlever aux chauffeurs la tentation de se livrer à cette pratique détestable, qui consiste à surcharger ou immobiliser la soupape de sûreté; à cet effet, il a imaginé une soupape dite *incalable,* qui est représentée

[1] *Décret du 30 avril 1880 sur l'emploi des générateurs et récipients de vapeur, autres que ceux qui sont placés à bord des bateaux à vapeur.*

Art. 6. Chaque chaudière est munie de deux soupapes de sûreté, chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que la pression effective atteint la limite maximum imposée par le timbre réglementaire. L'orifice de cette soupape doit suffire à maintenir, *celle-ci étant au besoin déchargée ou soulevée,* et quelle que soit l'activité du feu, la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède pour aucun cas la limite ci-dessus.

par la figure 46 ci-jointe. La soupape proprement dite *AA* est chargée, comme à l'ordinaire, par un poids, qui agit sur elle par l'intermédiaire du levier *BB* et du pointeau *C*; elle renferme une seconde soupape *D*, de plus petit diamètre et s'ouvrant de haut en bas; un ressort en hélice *EE* appuie cette soupape sur son siège; l'action du pointeau *C* est transmise à la grande soupape *AA* par l'intermédiaire du ressort *EE*, lequel est réglé de manière à laisser lever la soupape *AA* lorsque la pression maximum est atteinte; en réalité, nous avons ici une soupape chargée par un ressort soustrait à l'action du chauffeur; si le chauffeur cale son levier, la soupape lèvera néanmoins, en faisant fléchir le ressort; si le chauffeur veut surcharger le levier, il enfoncera la petite soupape *D* et la vapeur s'échappera. Tout dépend du réglage du ressort; on le tend plus ou moins à l'aide de l'écrou *aa*, et il faut admettre qu'une fois qu'il est réglé, le chauffeur ne peut plus y toucher. Signalons en passant les gorges *bb*, pratiquées sur le pourtour de la grande soupape, et qui tendent à la maintenir ouverte quand la vapeur s'échappe; nous aurons à revenir sur ce dispositif, qui a reçu d'intéressantes applications.

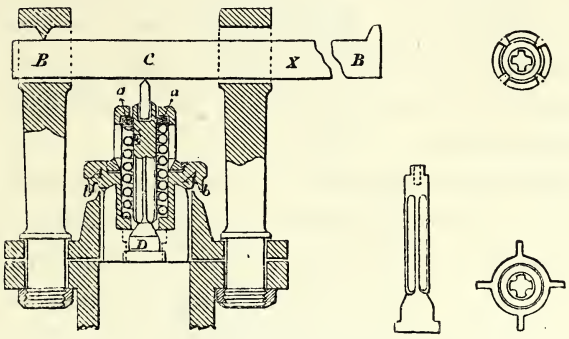


Fig. 46. — Soupape incalable système T. Coret.

On retrouve à l'Exposition d'autres soupapes de sûreté dites *incalables*, reposant sur des principes plus ou moins analogues. L'efficacité de ces appareils ne laisse pas que d'être un peu douteuse: il semble difficile qu'un simple appareil mécanique puisse lutter contre la volonté de mal faire, qu'elle vienne d'un chauffeur ou d'un patron imprudent.

Considérée comme appareil automatique, une soupape de sûreté serait parfaite, si elle pouvait réaliser ce résultat, de se lever à la pression voulue et de maintenir exactement cette pression aussi longtemps que la production de vapeur serait en excès; il faudrait pour cela que la levée fût toujours en relation déterminée avec l'excès de production. Ce simple énoncé suffit pour démontrer que la solution rigoureuse est impossible : la levée de la soupape n'est nullement fonction de l'excès de production, qui varie avec l'activité du foyer, avec l'ouverture des prises de vapeur, etc.; elle ne dépend que de la pression. Toutefois il est possible d'obtenir une solution approximative, qui consiste à limiter la pression de telle sorte, qu'elle ne puisse pas s'élever beaucoup au-dessus de la valeur qui correspond au commencement de la levée; il suffit pour cela de donner à la soupape un très grand diamètre, eu égard à la puissance de la chaudière sur laquelle elle est montée. La solution théoriquement est satisfaisante, pratiquement elle a l'inconvénient d'exiger des organes très volumineux, fort coûteux et difficiles à tenir étanches.

On a cherché à tourner la difficulté par divers artifices : un des plus ingénieux a été imaginé et appliqué avec succès par l'ingénieur anglais Thomas Adams; c'est ce dispositif qui se trouve reproduit dans la soupape Coret précédemment décrite (fig. 46). Il consiste à munir le pourtour de la soupape, en dehors du portage, d'une sorte de rebord incliné; au moment de la levée, le jet de vapeur qui s'échappe vient frapper cette surface oblique, est infléchi vers le bas et détermine une réaction verticale, qui vient s'ajouter à la pression statique de la vapeur et augmenter la levée. On peut ainsi obtenir des levées beaucoup plus fortes qu'avec les soupapes plates et, par suite, réduire très notablement le diamètre pour un même débit.

M. L. Dulac, de Paris, applique un principe analogue sous une forme un peu différente; la soupape ordinaire *AA* (fig. 47) est prolongée par un cône *BB*, enveloppé à distance par un cône creux *CC*, qui fait partie du siège; l'écoulement de la vapeur détermine, dans la capacité comprise entre ces deux cônes, une légère surpression, qui vient en aide à la pression motrice; de plus, le choc du jet de vapeur agit encore sur le haut du cône *BB*. L'établissement des formes des différentes parties du système exige des tâtonnements assez laborieux; mais, lorsque les proportions sont convenablement calculées, la soupape devient fort sensible, sa levée est considérable, même pour un faible accroissement de pression, et la tension du fluide dans la chaudière est maintenue dans des limites étroites. Pour atténuer les effets de lancé, M. Dulac munit sa soupape d'un amortisseur *D*, qui n'est autre chose qu'un piston plongeur à faible jeu.

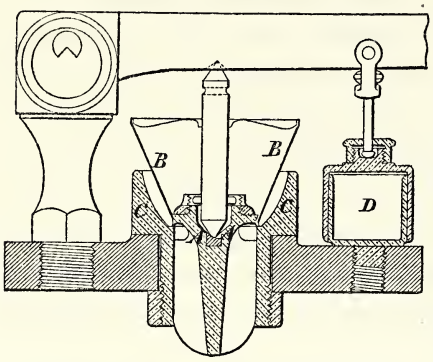


Fig. 47. — Soupape à levée progressive S.-L. Dulac.

Sous le nom de *Wilson-Klotz Duplex Safety Valve,* M. Valère Mabille, de Mariemont (Belgique), présente un système de soupape à grande levée et fort ingénieusement combiné. Ainsi qu'on l'a vu précédemment, avec une soupape ordinaire, l'écoulement de la vapeur détermine une dépression aux abords de l'orifice qui débite. Pour éviter cet effet, l'auteur va prendre le fluide à l'état statique dans le centre du réservoir de vapeur et le fait agir sur un piston qui commande l'ouverture de l'orifice d'écoulement.

La soupape a la forme indiquée en *AA* par la figure 48; ses parois latérales sont taillées en cylindre, le bord portant sur le siège fixe *BB*; ce siège est lui-même fermé par un diaphragme *CC* formant piston à l'intérieur de la partie mobile; au centre est fixé un tube *DD*, qui va prendre la vapeur dans la partie tranquille de la chaudière et l'amène dans l'espace superposé au diaphragme *CC*, où elle agit par sa pression à l'état statique sur le fond de la soupape; le joint du piston avec le cylindre est libre, les fuites

qui se produisent n'ayant aucun inconvénient. La soupape est chargée par un ressort en hélice *EE*, contenu dans une enveloppe qui le met à l'abri du contact de la vapeur.

Il convient de rappeler que ce système n'est pas absolument nouveau; déjà, en 1859, MM. Bodmer et Labeyrie avaient imaginé une soupape qui, aussi bien comme principe que comme disposition, se rapprochait beaucoup de celle que nous étudions. Il y avait toutefois une différence importante : la soupape Bodmer et Labeyrie était chargée par un poids; cette charge étant constante, la soupape se levait en grand aussitôt franchie la pression limite. Ici, il n'en est plus de même, la charge est obtenue par un ressort raide et court, c'est-à-dire qu'elle croît en même temps que la levée; il en résulte que la levée est progressive, qu'elle augmente avec la pression, condition indispensable pour que le fonctionnement soit doux et régulier. Ajoutons, comme détail complémentaire, que les soupapes Wilson sont couplées par paires, les deux ressorts agissant sur les bras égaux d'un même levier, ce qui fait qu'on ne peut pas les surcharger, attendu que si l'on appuie sur un des bras, on décharge l'autre d'autant.

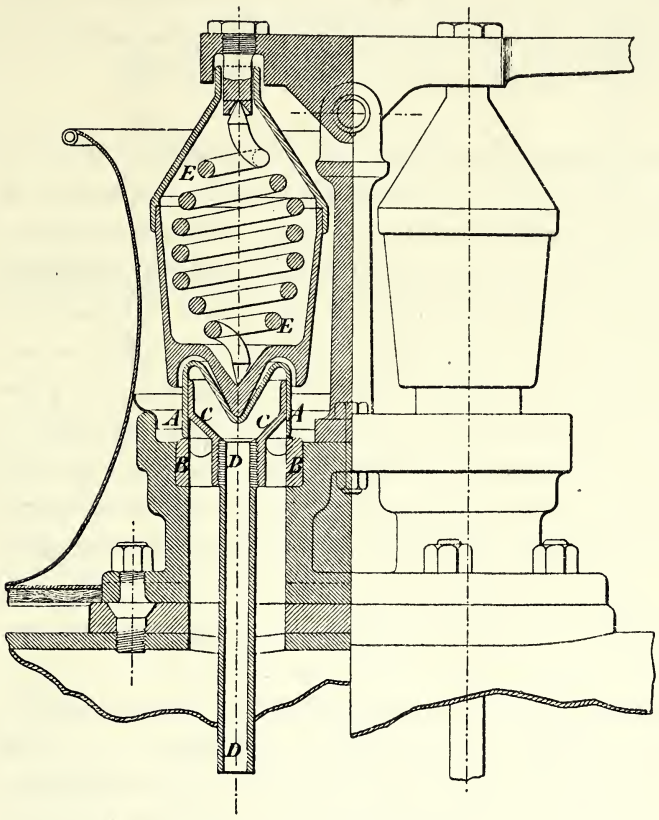


Fig. 48. — Soupape Wilson.

M. Brouillet, de Paris, a repris l'idée fort ancienne de créer sur la paroi de la chaudière un point faible, disposé pour céder d'une façon inoffensive en cas d'excès de pression; c'est un diaphragme mince en cuivre, pincé sur son pourtour dans une bride, et dont le milieu est en contact avec une lame tranchante en forme de croix; lorsque la pression devient trop forte, le diaphragme fléchit, se fend sur la lame, puis se déchire en grand, en donnant issue au fluide; on peut combiner empiriquement les dimensions de manière à obtenir la crève (nom donné par l'inventeur à ce phénomène) à une pression déterminée, à 1 ou 2 kilogrammes près.

Le joint Brouillet est un appareil de détresse; chaque fois qu'il joue, il met la chau-

dière en chômage. L'auteur a cherché, par des combinaisons plus ou moins compliquées, à pallier cet inconvénient grave. Il ne semble pas que, pour les applications aux chaudières à vapeur, ce système puisse soutenir la comparaison avec l'antique soupape de sûreté, mais il peut en être autrement dans le cas de récipients contenant des gaz comprimés, car le joint Brouillet est tout à fait étanche jusqu'au moment où il se déchire; la soupape de sûreté est loin de présenter la même étanchéité.

Nous arrivons actuellement aux appareils ayant pour objet d'empêcher le niveau de l'eau de s'écarter notablement de sa position normale. En vertu des règlements en vigueur, le plan d'eau, dans une chaudière en feu, ne doit pas s'abaisser au-dessous d'un certain niveau, déterminé de façon qu'il reste toujours de quelques centimètres (0 m. 06 au minimum en France) au-dessus des points les plus élevés de la partie de la paroi baignée par les flammes. A part quelques rares exceptions, sur lesquelles nous aurons à revenir, les appareils ayant pour objet de remplir cette condition sont purement indicateurs; ils montrent au dehors la position qu'occupe le plan d'eau dans la chaudière; les indications visuelles sont, dans quelques types, complétées par des signaux acoustiques, qui retentissent lorsque le plan d'eau sort des limites assignées.

Ces appareils, tels qu'ils se construisent aujourd'hui, peuvent se ranger dans quatre catégories :

Les tubes de niveau; les flotteurs; les robinets de jauge; les appareils de détresse.

Le tube de niveau est considéré, à juste titre, comme fournissant les indications les plus exactes et les plus certaines, lorsqu'il est bien établi et en bon état; il est rendu obligatoire par les règlements. Il consiste, comme on sait, en un tube vertical en verre ou en cristal, placé à la hauteur du niveau ordinaire de l'eau, et communiquant par ses deux extrémités avec la chaudière. Les montures en bronze, entre lesquelles le tube transparent est compris, portent des robinets et des bouchons vissés, qui permettent de nettoyer l'appareil et les canaux qui le relient à la chaudière; un index marque la hauteur au-dessous de laquelle le niveau ne doit pas descendre.

C'est sur ce modèle, déjà fort ancien, que sont constitués, à quelques variantes près, tous les tubes de niveau que l'on rencontre sur les générateurs de vapeur. Le seul inconvénient qu'il présente, c'est que le tube est fragile et exposé à se rompre sans prévenir; lorsque cet accident, assez fréquent, se produit, le chauffeur peut être blessé, soit par les débris du verre, soit par les jets d'eau chaude et de vapeur qui jaillissent des montures; en outre, la chaudière se vide, si l'on n'a pas la possibilité ou la présence d'esprit de fermer promptement les robinets qui commandent les canaux reliant les montures à la chaudière.

Le meilleur moyen d'éviter ces accidents, c'est d'avoir de bons tubes et de les monter soigneusement. Il faut avoir soin, dans le montage, de bien centrer les garnitures, de telle sorte que le verre ne soit pas en contact avec le métal. Quant à la

qualité du verre, c'est affaire au fabricant. Parmi les exposants de tubes de cette nature, citons M. John Moncrieff, de Perth (Écosse), dont la marque a une certaine réputation; le petit croquis (fig. 49) ci-joint indique le procédé qu'il recommande pour couper les tubes de longueur; c'est une petite tige en acier, terminée par un tranchant à angle droit, lequel permet de couper le tube par l'intérieur.

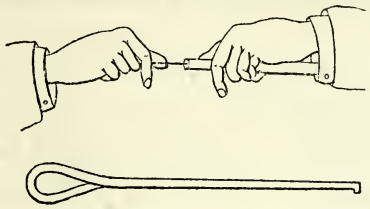


Fig. 49. — Coupe-tubes Moncrieff.

Fig. 50. — Coupe-tubes Ducomet.

Dans le même ordre d'idées, M. Ducomet, de Paris, présente le petit outil (fig. 50) qui est d'un usage très commode; c'est un éclat de diamant fixé à l'extrémité d'une tige en métal recouverte d'étoffe; sur ce manche est monté un petit disque, que l'on peut déplacer à volonté, suivant la longueur du tube à détacher, et fixer au moyen d'une vis de pression; ce disque assure la régularité de l'entaille.

Malgré tous les soins, on ne peut éviter d'une manière certaine la casse du tube. Quelquefois on l'entoure d'une gaine en toile métallique, ou on dispose un écran qui arrête les éclats du verre. On recommande aussi l'usage d'une petite tringle, réunissant les manettes des deux robinets du haut et du bas, et qui permet de les fermer à la fois et d'un seul coup. Certains constructeurs disposent sur les deux canaux d'amenée de petites soupapes qui se ferment d'elles-mêmes en cas de rupture.

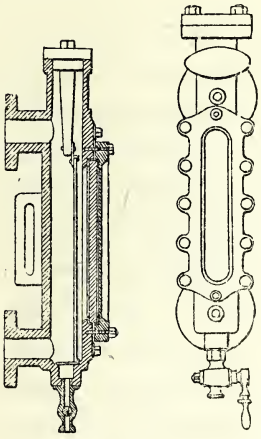


Fig. 51.
Indicateur système Vaultier.

MM. Martel et Bousselet (ancienne maison Herbepin), de Paris, présentent un niveau imaginé par M. Vaultier (fig. 51), et dans lequel le tube est remplacé par une glace plane, épaisse et en verre trempé; en arrière est disposée une plaque d'émail, qui rend les indications plus visibles. M. Gautreau, de Dourdan (Seine-et-Oise), présente un dispositif analogue.

On voit combien est insignifiant le contingent apporté par la dernière exposition au perfectionnement du tube de niveau, cet organe si important pour la sécurité.

En dehors du tube de niveau, qui est réglementaire, toute chaudière est munie d'un second appareil indicateur de la hauteur du plan d'eau; les dispositions de ce second appareil sont laissées au choix du constructeur; on emploie d'ordinaire, soit un autre tube de niveau, soit un *flotteur*.

Autrefois, les flotteurs pour chaudières étaient presque toujours formés d'une large

pierre plate, suspendue et équilibrée au bout d'un levier. On trouve encore cette construction sur d'anciennes chaudières; elle a donné lieu à de nombreux accidents : la pierre se décomposait ou tombait, et alors l'appareil indiquait trop d'eau, quel que fût le niveau dans la chaudière.

Aujourd'hui on se sert à peu près partout de flotteurs en métal; on leur donne la forme d'une lentille, composée de deux calottes sphériques en cuivre rouge, agrafées et soudées sur leur pourtour; avant de faire la soudure, on introduit dans la lentille un peu d'eau; la vapeur émise par cette eau prend la température et, par conséquent, la pression de la vapeur ambiante, et l'appareil n'est pas exposé à être écrasé. Il faut que la soudure soit bien faite, sans quoi le flotteur se remplit d'eau et tombe; mais en pareil cas, il indique manque d'eau, et cette indication fausse présente moins de dangers que l'indication opposée.

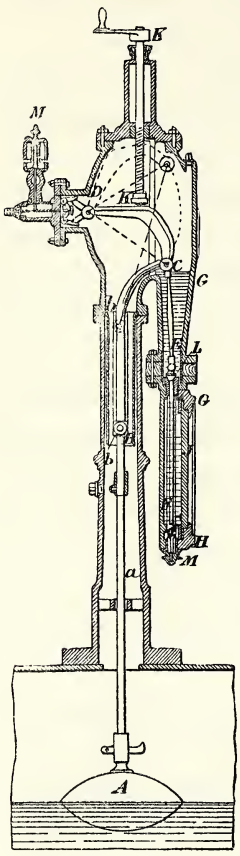


Fig. 52.
Indicateur glace, système Dupuch.

Une des difficultés que l'on rencontre dans l'emploi des appareils en question, c'est la transmission des mouvements du flotteur à l'index, qui doit les traduire à l'extérieur du générateur. Avec une transmission mécanique, il faut un joint étanche, presse-étoupe ou autre, au passage de la paroi de la chaudière; de là des frottements, qui peuvent paralyser le jeu ou fausser les indications.

M. Dupuch, de Paris, dispose la transmission dans une capacité communiquant librement avec la chaudière, c'est-à-dire sans presse-étoupe; les lectures se font à travers une glace épaisse, et pour éviter que cette glace ne soit brisée par l'effet des variations de température, les choses sont disposées de telle sorte qu'elle n'est en contact qu'avec de l'eau tiède. La figure 52 montre la disposition de l'appareil. Le flotteur *A*, dont la tige est guidée par l'anneau *a* et la glissière *bb*, transmet son mouvement, par la bielle courbe *BC*, au levier *CD* tournant autour de *D*; le point *C*, à son tour, renvoie le mouvement, par la bielle *CE*, à la tige pendante *EF*, terminée par une perle d'émail *F*; le cul-de-sac vertical *GGH* se remplit d'eau tiède et claire de condensation; l'index se voit à travers la glace *JJ*. Pour changer la glace, il suffit d'agir sur la vis *KK* : cette vis fait descendre le levier *CD*, et la petite soupape *L* vient s'appuyer sur son siège.

Comme beaucoup d'appareils analogues, l'indicateur Dupuch donne des signaux acoustiques; il est muni à cet effet d'un sifflet *M*, mis en action par le levier *CD*, et qui retentit quand le flotteur est trop haut ou trop bas.

On a obtenu de bons résultats en se servant d'un aimant pour opérer la transmis-

sion entre le flotteur et l'index. Les indicateurs magnétiques sont fort employés; la maison Lethuillier-Pinel, de Rouen, a beaucoup vulgarisé l'usage de ces utiles instruments; à l'Exposition, M. Paul Carette, ingénieur à Hamégicourt (Aisne), présente un indicateur magnétique d'une bonne et solide construction.

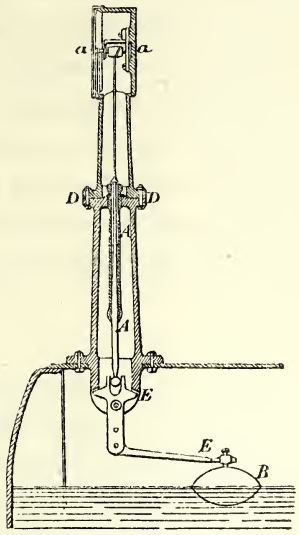


Fig. 53. — Indicateur métallique, système Chaudré.

Dans l'indicateur métallique imaginé par M. Chaudré, de Paris, et qui d'ailleurs figurait déjà à l'Exposition de 1878, la transmission est opérée (fig. 53) à l'aide d'un tube *AA*, mince et élastique, qui n'oppose aux mouvements du flotteur *B* qu'une résistance insensible; le haut du tube est fixé sur la tubulure *DD*; le bas est soudé sur une tige *EE*, actionnée par le flotteur, et qui agit par l'intermédiaire d'une rainure ou hélice sur l'axe *aa* de l'aiguille indicatrice.

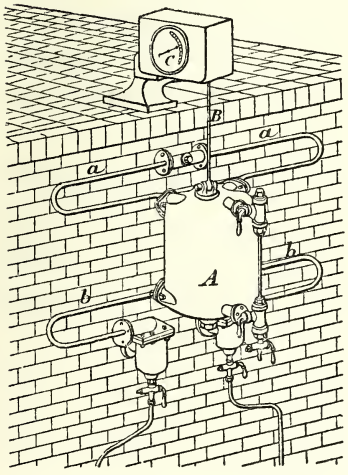


Fig. 54. — Indicateur système Dulac.

M. Dulac, de Paris, présente (fig. 54) un indicateur, dont le jeu repose sur un principe ingénieux; un récipient fermé *A* est suspendu par la tige *B* à un levier de balance contenu dans la boîte *C*; il est équilibré par un contrepoids, calculé de manière que le levier soit horizontal quand le récipient *A* est à demi plein d'eau; ce récipient est mis en relation avec la chaudière, à la façon d'un tube de niveau, par deux paires de tubes longs et flexibles *aa* et *bb*. Dès que le niveau s'élève dans la chaudière, le poids du récipient s'augmente d'autant, et le levier s'incline; ces oscillations sont transmises à une aiguille indicatrice; elles peuvent également être enregistrées sur un disque mobile. L'appareil est complété par un tube de niveau monté sur le récipient *A*.

Le tube de niveau et le flotteur se rencontrent sur la plupart des chaudières fixes. Sur les chaudières mobiles, le flotteur fonctionne mal; on le remplace, soit par un second tube de niveau, soit par des *robinets de jauge;* ce sont de simples robinets montés sur la chaudière aux alentours du plan d'eau moyen; en les ouvrant successivement, on voit, à un instant donné, quelle est la hauteur de l'eau dans la chaudière.

On fait également usage, dans certains cas, du bouchon fusible; c'est un bouchon de plomb, fermant un trou pratiqué à travers la paroi de la chaudière; on l'établit dans le voisinage du foyer, à la hauteur limite au-dessous de laquelle le niveau de l'eau ne saurait descendre, sans que le coup de feu soit imminent. Si le plan d'eau vient à s'abaisser au-dessous de la limite dangereuse, le plomb fond et la vapeur s'échappe en éteignant le feu. La plupart des locomotives portent, sur le ciel du foyer, un ou plusieurs bouchons pareils; on commence aussi à les appliquer sur les chaudières fixes. Les bouchons fusibles sont des appareils de détresse; si la chaudière est régulièrement conduite, ils ne doivent jamais fonctionner; lorsqu'ils fonctionnent, c'est qu'il y a eu faute, et alors ils mettent la chaudière hors de service pour un certain temps; leur objet, c'est, en cas de danger, de provoquer un petit accident, qui en prévienne un beaucoup plus grave. Dans les chemins de fer, les bouchons fusibles sont généralement considérés surtout comme les dénonciateurs de la négligence du personnel.

Toute chaudière, toute canalisation comportent un nombre plus ou moins grand d'obturateurs mobiles, servant à ouvrir à volonté ou à interrompre les communications. Nous n'avons à nous occuper ici que de ceux de ces appareils qui desservent des courants de vapeur. Leurs destinations sont très variées et il en est de même de leurs dispositions. Certains constructeurs se sont spécialisés dans la robinetterie. Ils livrent au commerce ce que l'on appelle des « garnitures de chaudière », c'est-à-dire les organes de sûreté et de service, ainsi que les appareils à monter sur les conduites dépendant des générateurs. Quelques-uns de ces constructeurs présentaient à l'Exposition des produits remarquables par leurs bonnes dispositions et leur excellente construction; citons, parmi les maisons parisiennes, MM. Muller et Roger, MM. Martel et Bousselet, E. Bourdon, Dupuch, Lehmann frères, Colombier, etc.

La robinetterie pour vapeur exige des soins tout particuliers, car elle est exposée à de nombreuses causes d'avaries; les accidents les plus ordinaires auxquels elle donne lieu sont : les grippements, qui paralysent le jeu des organes, et les fuites, qui non seulement sont déplorables au point de vue de l'économie, mais encore entraînent une détérioration rapide des pièces et peuvent occasionner de sérieux accidents.

Dans la robinetterie pour vapeur, le bronze de bonne qualité est à peu près le seul métal employé pour tous les organes formant joint mobile; on commence aussi à faire usage du bronze phosphoreux, et à ce point de vue, l'exposition de MM. Lehmann frères était fort remarquable.

Le système d'obturateurs le plus en usage pour les conduites de vapeur est le robinet à boisseau; toutefois il ne s'applique guère qu'à des conduites de petit diamètre; sur les grosses conduites, il devient difficile à manœuvrer et donne facilement lieu à des fuites. Même sous de petites dimensions, les robinets à boisseau sont assez délicats d'établissement et d'entretien; on en rencontre fort souvent qui sont en mauvais état.

Beaucoup d'industriels leur préfèrent aujourd'hui les robinets à vis, qui se répandent de plus en plus, surtout dans les chemins de fer.

Le robinet à vis simple est composé d'une tige filetée et terminée par un pointeau, qui s'appuie sur les bords de l'orifice à obturer; pour certaines applications, la tige traverse un presse-étoupe. Pour les hautes pressions, M. E. Bourdon donne au bout du pointeau la forme d'une sphère, s'emboîtant dans un cône de médiocre ouverture; il obtient ainsi un joint tout à fait étanche.

Dans les appareils que nous venons de décrire, l'organe obturateur, étant solidaire de la tige filetée, tourne en même temps qu'elle, ce qui produit des frottements éner-

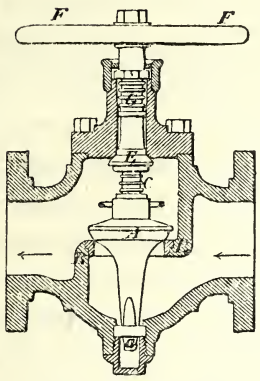
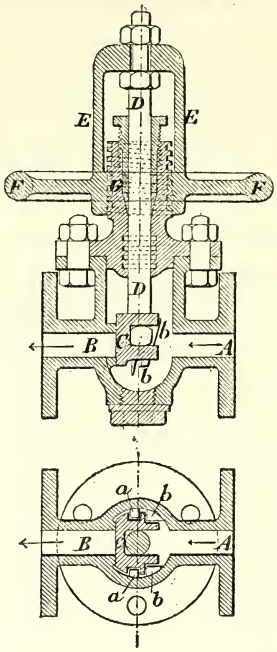


Fig. 55. — Robinet à vis.



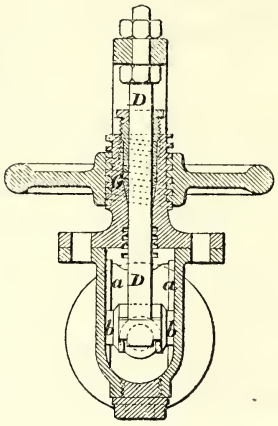


Fig. 56. — Robinet à admission directe, système Pile.

giques au moment du contact et peut amener des grippements. Le système cesse d'être applicable dès que l'ouverture à fermer est un peu large. On a alors recours à divers dispositifs. L'un des plus simples est représenté par la figure 55 ci-jointe : l'obturateur est une simple soupape *A*, appuyée sur son siège *BB* par la tige filetée *C*, se vissant dans l'écrou *E*; ce dernier est manœuvré par le volant *FF*; l'écrou *E* est muni d'une portée conique, remplaçant le presse-étoupe, et qui est appuyée sur son siège par le ressort à boudin *G*; un guidage à deux faces planes *a* empêche la soupape de tourner. L'appareil est simple, facile à démonter, à entretenir et à manœuvrer.

Le système imaginé par M. Pile, de Paris, auteur de plusieurs améliorations sérieuses dans les accessoires de chaudières et de machines, est représenté fig. 56. M. Pile a eu en vue d'éviter les coudes et rétrécissements qui, dans beaucoup d'appareils,

IMPRIMERIE NATIONALE.

gênent l'écoulement du fluide; les conduites d'arrivée *A* et de départ *B* sont dans le prolongement l'une de l'autre. L'organe obturateur *C* est un simple tiroir glissant sur une glace; il est manœuvré par une tige lisse *DD* et guidé par deux glissières rectilignes *aa*; l'obturateur à fond de course est fortement appuyé sur son siège par deux plans inclinés *bb*; la tige traverse un presse-étoupe métallique et reçoit son mouvement, par l'intermédiaire d'une arcade *EE*, du volant *FF* et de la vis *GG*, laquelle est extérieure et indique à chaque instant la position de l'obturateur. L'ensemble est bien disposé, compact, et le jeu des dilatations se fait librement.

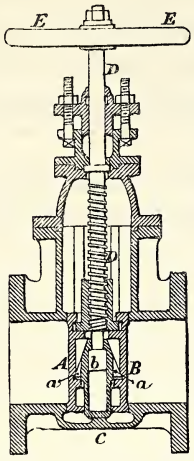


Fig. 57. — Robinet-valve, dit *peet-valve*.

L'usage des tiroirs glissants comme prises de vapeur est du reste fort répandu; le plus souvent le dispositif est complété, comme ci-dessus, par des plans inclinés appuyant sur son siège l'obturateur à fond de course. La figure 57 représente un système connu sous le nom de *peet-valve* et qui a reçu de fort nombreuses applications. La conduite conserve sa section circulaire et sa direction rectiligne. L'obturateur est double et constitué par deux plans *A*, *B*, commandés par l'écrou *C* et la tige filetée *DD*; les faces intérieures de ces tiroirs portent des plans inclinés *aa*, qui viennent s'appuyer sur un obstacle *b*, taillé à la demande et butant sur le fond *c* de l'appareil. Le tout est manœuvré par un volant *EE*. Cette double obturation assure efficacement l'étanchéité. Les peet-valves ont donné lieu à quelques accidents dont les conséquences ont été fort graves; ces accidents ont consisté dans la rupture de la boîte formant la paroi de l'appareil; on voit, d'une part, que les dilatations ne peuvent se faire librement; d'autre part, il est à remarquer que les efforts exercés sur le volant sont multipliés par le pas de vis et par les plans inclinés, dans une proportion qu'on peut considérer comme dangereuse.

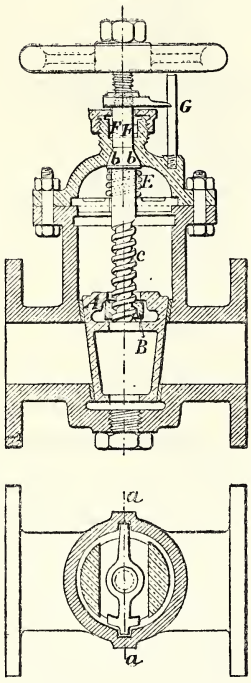


Fig. 58. — Robinet-vanne, système Véry.

Le robinet-vanne présenté par M. A. Véry, de Paris (fig. 58), se rapproche comme principe de la peet-valve; l'obturation est faite par un cône *A*, qu'il est facile de roder et de tenir étanche; l'écrou *B* qui conduit ce cône est très libre dans son logement; il est guidé par deux rainures *aa*; la tige de manœuvre *cc* traverse la paroi de la boîte par un joint conique *bb*, dont le contact est assuré par le ressort *E*; l'étanchéité de ce joint est complétée par un petit presse-étoupe *FF*; une aiguille *G* indique, sur une réglette à échelle réduite, les déplacements de l'obturateur.

Dans le robinet-vanne à tige brisée de M. G. Dupuch, de Paris (fig. 59), l'obturateur est un plan oblique, qui vient se coincer entre ses deux sièges; afin de donner toute aisance à ses mouvements, on a coupé la vis de manœuvre, qui reçoit la commande du volant, par l'intermédiaire d'un carré très libre; comme dans plusieurs des dispositifs précédemment décrits, le presse-étoupe est remplacé par un joint conique.

Le décret du 30 avril 1880 prescrit l'établissement d'un clapet de retenue au point d'insertion de la conduite alimentaire sur le générateur; ce dispositif était depuis long-

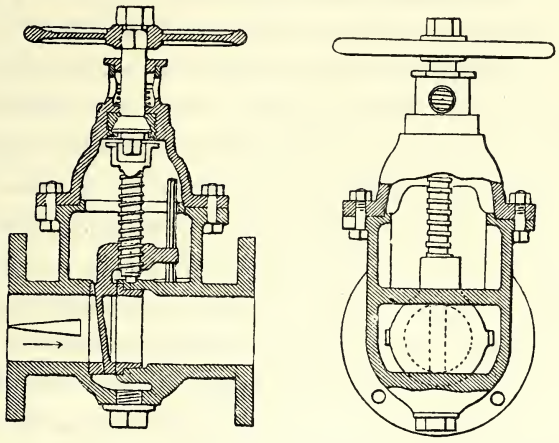


Fig. 59. — Robinet-vanne à tige brisée, système G. Dupuch.

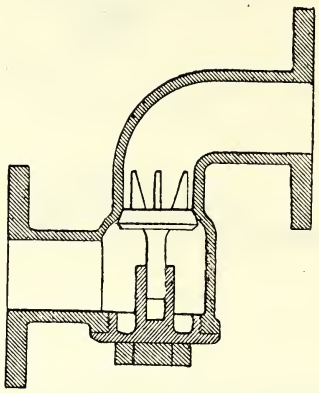


Fig. 60. — Boîte à clapet coudée.

temps pratiqué par les bons constructeurs, mais il n'était pas jusqu'alors imposé par les règlements. Le clapet de retenue d'alimentation a pour effet de prévenir certains accidents graves, qui se sont plus d'une fois produits, à savoir, la vidange rapide de la chaudière, en cas de rupture ou de fuite dans la conduite alimentaire. Dans les installations où plusieurs chaudières sont réunies en batterie et desservies par une même conduite alimentaire, la moindre inégalité de pression d'une chaudière à l'autre suffit pour amener le siphonnement de l'eau par l'intermédiaire de la conduite commune; dans le générateur, où la pression est le plus élevée, la baisse du plan d'eau peut devenir très rapide; les clapets de retenue s'opposent à ces effets dangereux.

La forme de ces appareils est très simple; la figure 60 représente une soupape de retenue. Pour que l'on n'ait pas à craindre le coincement ou l'arc-boutement de la partie mobile, il importe que le guidage ait lieu sur une grande longueur.

Les canalisations de vapeur, qui jouent un rôle si considérable dans les grandes usines et dans toutes les expositions, ont acquis en Amérique, depuis quelques années, une importance comparable à celle des canalisations de gaz ou d'électricité; dans plusieurs villes des États-Unis, il a été installé des distributions de vapeur ou d'eau surchauffée, pour le service du chauffage et de la force motrice, comportant plusieurs

kilomètres de développement. Cette application est neuve et n'est pas encore sortie de la période des essais; on ne saurait prévoir dès maintenant quel est l'avenir qui lui est réservé. En tout cas, la question des canalisations mérité d'être étudiée.

Une canalisation est constituée par des bouts du tuyau, réunis entre eux par des joints étanches; elle comporte, en outre, des dispositifs propres à assurer les dilatations, et d'autres organes accessoires. La plupart des canalisations de vapeur se font en tuyaux de fonte. Cependant les canalisations de New-York et de Boston sont exécutées en tuyaux de fer étiré; ce mode de construction est fort usité en Amérique pour les conduites de vapeur; toutefois on l'avait jusqu'ici réservé aux conduites de petit diamètre. On fait quelque usage, pour les gros tuyaux, de la tôle cintrée et rivée, et l'on assure à l'aide de la galvanisation la durée du métal et l'étanchéité de la rivure. Le cuivre en tuyaux soudés ou étirés est, comme par le passé, réservé pour les conduites cintrées et de médiocre longueur; sa malléabilité, sa facilité d'emploi, sa résistance à l'oxydation, son bel aspect lui conservent, pour ces sortes d'applications, une véritable supériorité; les usines métallurgiques fournissent aujourd'hui des tuyaux en cuivre étiré par bouts de grande longueur, de gros diamètre et d'une fabrication irréprochable.

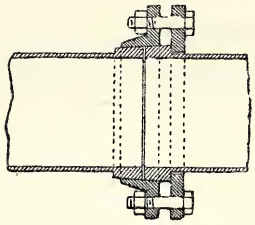


Fig. 51. — Joint conique des conduites de vapeur système de Naeyer.

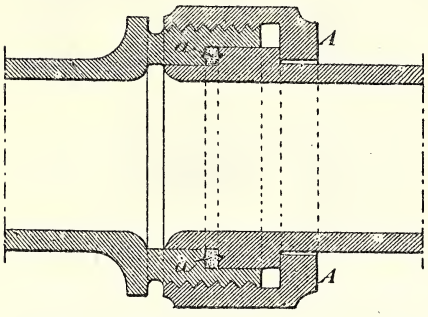


Fig. 62. — Raccord système D. Legat.

Quant aux joints qui réunissent entre eux les tronçons de la conduite, ils s'établissent presque toujours à écrou roulant, pour les petits diamètres, et à brides pour les gros tuyaux; le joint se fait à cru entre surfaces rodées, ou, le plus souvent, avec interposition d'une matière plastique.

Comme joint à cru, signalons le système appliqué par la maison de Naeyer (France et Belgique) pour ses grosses conduites de vapeur (fig. 61); ce dispositif exige un ajustage soigné; il manque un peu d'élasticité, mais il est simple et a donné de fort bons résultats à l'Exposition.

Le raccord imaginé par M. Legat, de Paris (fig. 62), comporte une bague *a*, en matière plastique; mais cette bague est emprisonnée dans une gorge, qui la comprime fortement sous l'action de l'écrou de serrage *A*.

Comme matière plastique pour les joints de vapeur, on fait toujours usage des divers mastics. Le mastic de fonte a donné lieu à de nombreux mécomptes, par son manque d'élasticité et par l'expansion qu'il subit à la prise; il est de moins en moins employé. Le

mastic de minium est toujours fort usité ; toutefois il tend à être remplacé par l'amiante, dont la mise en œuvre a été considérablement perfectionnée. L'amiante ou asbeste était, il n'y a pas bien longtemps, une véritable curiosité de laboratoire ; aujourd'hui, d'importantes usines fournissent à l'industrie des produits d'amiante variés et fort appréciés ; on file, on tisse, on feutre l'amiante ; ce minéral se présente dans le commerce sous forme de cordes, de fils, de toiles, de carton, qui sont inattaquables au feu et aux acides et conservent leurs propriétés au contact de la vapeur à haute pression.

Parmi les maisons qui exposaient des produits d'amiante applicables aux machines, nous citerons les maisons Albasini, Allard et Cie, de Paris, la Société française des amiantes, de Tarascon (Rhône), et la United Asbestos Co, de Londres.

L'amiante pour joints de tuyaux est employé sous forme de carton, que l'on découpe à la demande et que l'on serre entre les brides ; ces joints sont bien étanches, très propres, faciles à faire et à défaire ; ils ne foirent pas comme le mastic de minium. Pour les hautes pressions et si l'on a besoin d'une étanchéité absolue, on fait usage d'amiante caoutchouté. On fait également les joints avec des lames ou des fils de plomb ou de cuivre ; on emploie aussi des tresses en fils métalliques fins et flexibles, des tuyaux de plomb remplis de fibres métalliques, etc.

Les joints de dilatation, qu'il est nécessaire d'établir de distance en distance sur les conduites un peu longues, consistent le plus souvent en de simples presse-étoupe ; la garniture se fait en chanvre gras ou en corde d'amiante. Quelquefois la dilatation est obtenue par des diaphragmes flexibles, en tôle plate ou ondulée.

Les pertes de chaleur dans les conduites de vapeur un peu développées sont parfois fort grandes ; elles deviennent surtout importantes lorsque la conduite est exposée à nu en plein air, sous le vent, la neige ou la pluie. Non seulement la chaleur ainsi perdue correspond à une perte de combustible, qui est loin d'être négligeable, mais encore les produits de la condensation peuvent arriver jusqu'à la machine, en diminuer le rendement et y causer des accidents. Les industriels soigneux ne manquent pas de recouvrir d'enveloppes isolantes leurs tuyaux de vapeur. Les matières employées pour cet usage sont très nombreuses et variées. On se sert quelquefois de paille ou de foin, qu'on recouvre de toile ou d'argile. Le feutre est d'un bon et commode usage. Mme M. Lion, de Camps (Var), présentait à l'Exposition des feutres en bandes, d'un prix modéré et d'une mise en place facile.

Les matières minérales présentent plus de garanties de durée. L'amiante, sous forme de toile et de bourre, donne de bonnes enveloppes. Depuis quelques années on se sert beaucoup de *coton minéral* ou *laine de scorie ;* c'est une matière filamenteuse, obtenue par l'insufflation d'un jet de vapeur dans le courant de laitiers liquides qui s'échappent d'un haut fourneau. Tous les laitiers ne conviennent pas à cette fabrication ; on rencontre dans le commerce des laines de scories qui, d'aspect satisfaisant au premier abord, ne tardent pas à perdre leur caractère filamenteux et à tomber en poussière.

MM. Émile Muller et Cie, à Ivry-Port, près Paris, exposaient de nombreux et fort beaux produits en laine de scorie; cette matière contient des silicates de chaux, d'alumine et de magnésie; elle est manufacturée sous diverses formes, correspondant à des emplois variés; pour le revêtement des tuyaux, elle est fournie en bandes de 20 à 5 millimètres d'épaisseur, qu'on enroule en hélice et qu'on fixe à l'aide d'un treillage métallique.

Un grand nombre de fabricants présentent des enduits ou mastics calorifuges, de compositions variées et quelquefois tenues secrètes, et qu'on applique soit à chaud, soit à froid.

Le liège est fort employé depuis quelques années, soit à l'état de poussières ou de déchets incorporés dans des mastics, soit sous formes de bandelettes, dont on entoure le tuyau à revêtir, en serrant le tout avec un fil de fer; on le livre également en longues bandes élastiques, qui peuvent être enroulées en hélice autour de la conduite.

L'injecteur alimentaire est resté à peu près ce qu'il était depuis la dernière Exposition. Le merveilleux appareil imaginé par Giffard est sorti complet des mains de son inventeur; le principe est resté le même, et si certains organes ont été modifiés, c'est dans le sens de la spécialisation, en vue d'applications à des cas particuliers. La théorie de cette machine, incomplète dès l'origine, n'a pas beaucoup avancé; il lui manque toujours la précision, qui permet de prévoir et de calculer; comme par le passé, les proportions des diverses parties des injecteurs sont établies à l'aide de formules empiriques.

Les injecteurs, comme on sait, sont aspirants ou non aspirants, suivant que la bâche où puise l'appareil est placée au-dessous ou au-dessus. Les injecteurs aspirants sont d'une construction plus complexe et d'une manœuvre plus délicate : la mise en marche de ces appareils commence par une opération spéciale, l'amorçage, qui a pour objet d'élever l'eau de la bâche, de manière à l'amener en contact avec le courant de vapeur; lorsque au contraire l'eau arrive en charge, l'amorçage se trouve supprimé, ainsi que toutes les complications qu'il comporte.

Comme injecteur non aspirant, on peut citer celui présenté par M. Guyenet, de Paris, établi par cet ingénieur en collaboration avec M. Bohler. Le système est extrêmement simple (fig. 63) et se comprend à première vue; la vapeur arrive en *A*, l'eau en *B*; le refoulement se fait par la soupape *C*; *D* est le dégorgeoir.

M. Ph. Vabe, de Paris, présente un injecteur aspirant (fig. 64) qui ne diffère pas en principe de celui de Giffard; l'amorçage est produit par le filet très mince de vapeur qui jaillit autour de l'aiguille *A*, quand on ouvre légèrement la soupape *B*, à l'aide de la manivelle *C*. M. Vabe améliore le jeu de l'appareil en perçant, sur le pourtour de la cheminée *D*, de petits trous, qui sont en communication avec la soupape *E*; dans le cas de fonctionnement irrégulier, la vapeur, au lieu de sortir par le tuyau

d'aspiration *FF*, s'échappe par cette soupape, ce qui diminue les chances de raté et facilite la mise en marche.

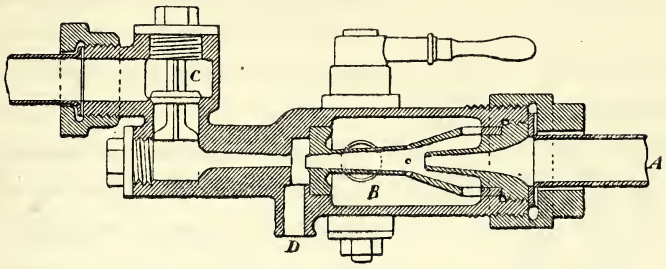


Fig. 63. — Injecteur non aspirant, système Bohler et Guyenet.

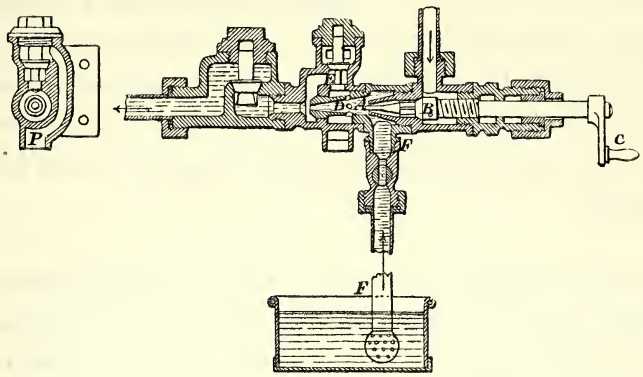


Fig. 64. — Injecteur aspirant, système Vabe.

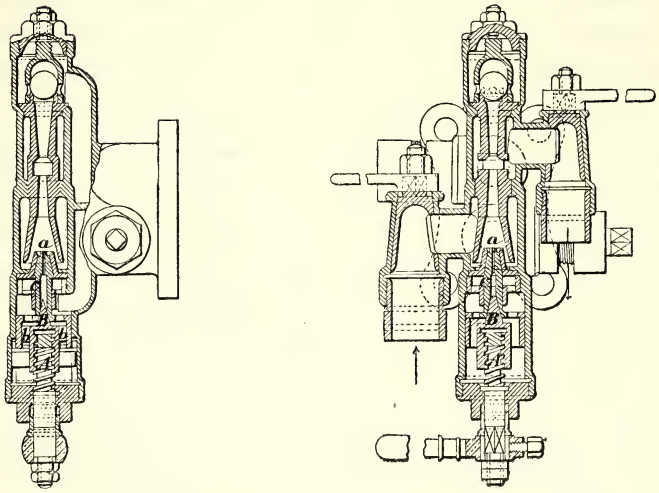


Fig. 65. — Injecteur Thiry et Chantrenne-Soiron.

MM. J. Thiry et Chantrenne-Soiron ont imaginé un injecteur qui était présenté par M. Chantrenne-Soiron, de Nivellet (Belgique). Cet appareil est aspirant (fig. 65). Un seul organe sert à produire l'amorçage et la mise en train; cet organe, c'est la vis *A*;

le premier mouvement de cette vis, en attirant le pointeau *B*, débouche le petit canal *a*, par lequel jaillit un mince jet de vapeur, qui amorce l'appareil; la vis *A* continuant à tourner, les ailettes *bb* viennent agir sur l'embase de la flèche *C*, laquelle s'ouvre en plein, en livrant passage à la vapeur.

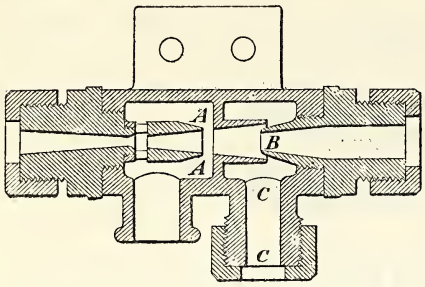


Fig. 66. — Éjecto-injecteur Cuau aîné et Cie.

L'éjecto-injecteur automatique de la maison Cuau aîné et Cie, de Paris (fig. 66), est un appareil intéressant; il est aspirant et ne comporte ni aiguille, ni clapet perforé, ni vis de mise en train; l'amorçage se produit de lui-même, lorsqu'on ouvre en plein l'arrivée de vapeur. Pour obtenir ce résultat, il a suffi d'interrompre, par un intervalle *AA*, la continuité de la cheminée; l'orifice de dégorgement *AA* présentant une section plus grande que le nez *B* de la tuyère, on n'a pas à craindre le refoulement de la vapeur dans la conduite *CC* d'aspiration; la présence de cet intervalle ne trouble en rien le fonctionnement normal de l'appareil.

Dans les pays où le charbon coûte cher et où il est nécessaire de l'économiser sévèrement, on adjoint souvent aux chaudières des *réchauffeurs d'eau d'alimentation*. Ce sont des récipients en forme de serpentins ou des faisceaux de tubes, qui sont chauffés par les gaz de la combustion, déjà refroidis partiellement par le contact de la chaudière, et qui sont parcourus par l'eau d'alimentation avant son entrée dans le générateur. Les réchauffeurs épuisent, pour ainsi dire, la chaleur qui reste encore dans les fumées, avant qu'elles soient lancées dans la cheminée. Le résultat économique est incontestable et ne manque nullement d'importance. Toutefois ces appareils ont présenté, à l'application, des inconvénients, et même ont donné lieu à des accidents sérieux. On leur reproche d'être fort encombrants et coûteux, sous peine de devenir inefficaces; ils sont exposés à se corroder rapidement sous l'action des fumées acides, qui se condensent à leur surface par suite de la température basse de l'eau qui les parcourt. Plusieurs usines ont renoncé à en faire usage. A l'Exposition de 1889, on n'en voyait plus qu'un assez petit nombre; ils accompagnaient quelques chaudières à petits éléments et étaient établis d'après une construction analogue.

A côté de leurs avantages comme économie de combustible, certains réchauffeurs, convenablement installés et de proportions suffisantes, possèdent une propriété précieuse : ils épurent l'eau d'alimentation et contribuent ainsi à maintenir propre l'intérieur de la chaudière; les matières en suspension ou en dissolution dans l'eau se précipitent dans le réchauffeur, par l'effet de l'élévation de température; ces précipités, étant formés dans des capacités éloignées du foyer, restent d'ordinaire à l'état boueux et leur enlèvement est facile. Toutefois cette fonction d'épurateurs, que possèdent les

réchauffeurs, demeure le plus souvent incomplète; la précipitation des sels ne se fait qu'à une température assez élevée, supérieure à celle que peut atteindre l'eau dans les réchauffeurs ordinaires, dont la surface de chauffe est presque toujours insuffisante.

Cette question de la propreté intérieure des chaudières a une importance extrême; les incrustations, en gênant la transmission de la chaleur, ont pour résultat, non seulement de diminuer la puissance de production du générateur et le rendement de combustible, mais encore de provoquer de dangereux coups de feu. A toute époque, on s'est rendu compte des inconvénients du tartre. Mais ces notions ont acquis beaucoup de précision, à la suite des recherches poursuivies de tous côtés, et notamment par les ingénieurs des associations de propriétaires d'appareils à vapeur. L'exposition de ces associations était, à cet égard, riche en enseignements utiles; elle contenait une collection fort instructive d'incrustations, variées comme consistance, comme formes et comme dispositions, et d'échantillons des accidents que ces incrustations peuvent amener. L'attention du public industriel s'est portée avec raison sur ce point important, et de nombreux procédés ont été proposés, ayant pour objet d'empêcher que les parois des chaudières ne se couvrent d'incrustations adhérentes. L'Exposition de 1889 présentait un grand nombre de ces inventions.

Laissons de côté les désincrustants omnibus, proposés par de nombreux inventeurs, et qui, au dire des prospectus, s'appliquent indifféremment à toutes les chaudières, quelles que soient leurs dispositions, leur allure et la nature des eaux qui les alimentent, et procurent infailliblement une propreté complète des tôles et des économies considérables de combustible. Le seul énoncé de pareilles prétentions suffit pour en faire justice. Ce ne sont pas d'ailleurs les noms pompeux ou bizarres qui font défaut : anti-tartres, tartrifuges, anti-incrustants, tartrivores, tartriphages, etc. Le latin et le grec ont été mis à contribution. La plupart de ces produits ont une composition gardée mystérieuse; en réalité, ce ne sont, le plus souvent, que des résidus de fabrication, qui seraient invendables, si on ne les décorait d'une étiquette capable de faire illusion. Certaines de ces matières, employées inconsidérément, ont rongé les chaudières et causé des accidents sérieux; d'autres, dans certains cas et par hasard, ont donné des résultats favorables, ni plus ni moins que certains remèdes secrets.

Pour éviter la formation des incrustations, il existe deux procédés, consistant à traiter l'eau, soit à l'intérieur de la chaudière, soit à l'extérieur.

Dans le traitement à l'extérieur, l'eau d'alimentation est épurée préalablement à son introduction dans la chaudière; les sels incrustants sont éliminés à l'avance, et le générateur ne reçoit qu'une eau saine et pure. Théoriquement, ce procédé possède une supériorité incontestable; toutefois, comme l'application ne peut en être faite qu'à l'aide d'installations assez coûteuses, on a hésité longtemps à l'adopter, et il n'a été pratiqué que dans des circonstances tout à fait exceptionnelles.

Le traitement intérieur, en général, a pour objet, non pas de diminuer l'importance

et le volume des dépôts, mais d'en modifier la nature, d'éviter qu'ils ne passent à l'état d'incrustations dures et de les maintenir sous la forme de boues et de poussières non adhérentes, qu'un simple balayage suffit pour éliminer. Deux modes de traitement intérieur sont en usage : par la chaleur et par les réactifs; ces deux modes sont fréquemment combinés ensemble.

Le traitement par la chaleur présente de grands avantages : le réactif est sous la main du chauffeur et il ne coûte rien, puisque en définitive il faut toujours chauffer l'eau introduite dans la chaudière. L'action de la chaleur précipite la plupart des sels, qui sont en dissolution dans les eaux ordinairement employées pour l'alimentation. Toutefois, pour que l'effet soit suffisamment complet, il est indispensable que la température soit assez élevée. C'est pourquoi le procédé est particulièrement efficace dans le cas des générateurs à petits éléments, qui travaillent presque toujours sous forte pression. Ainsi que nous l'avons vu, la plupart de ces générateurs sont pourvus d'appareils décanteurs, récipients assez vastes pour que l'eau s'y trouve à peu près en repos, et dans lesquels la circulation générale de la chaudière vient jeter successivement les précipités qui se sont formés au sein du liquide.

Le système, sans doute, est loin d'être nouveau; il y a bien longtemps que l'on avait proposé des dispositifs analogues, mais ils n'avaient pas, à l'époque, donné des résultats appréciables, par suite de l'insuffisance de la pression et peut-être aussi à cause de défectuosités dans les proportions et l'agencement des organes.

MM. Wilson et Roake, de New-York, exposent un système de décanteur spécial, fondé sur les mêmes principes.

La Société anonyme de l'épurateur Carroll, de Paris, expose un appareil, de l'invention de M. *W. J. Smith,* et qui consiste en un gros tube, perforé de trous à la partie supérieure, et divisé dans le sens de sa longueur par une cloison diamétrale; le tube est immergé horizontalement dans l'eau de la chaudière; le compartiment du bas reçoit l'alimentation; l'eau, saisie par la chaleur, laisse précipiter les sels qu'elle contient, lesquels se déposent dans le tube et en sont expulsés de temps à autre par des purges.

Lorsque la pression n'est pas élevée, les précipités, au lieu de s'agglomérer, restent longtemps à l'état de poussière impalpable; sous cette forme, ils sont susceptibles de prendre adhérence et de constituer des incrustations pierreuses; mais leur décantation dans un milieu tranquille est lente et incertaine; les décanteurs doivent présenter un volume considérable, sous peine de perdre toute leur efficacité. L'un des meilleurs procédés, en pareil cas, consiste à établir, dans la chaudière même, une cloison séparant de la surface de chauffe un volume d'eau suffisamment grand, dans lequel l'ébullition ne se produit pas et les dépôts peuvent se former. Le moyen a été proposé

depuis longtemps; il est présenté sous diverses formes à l'Exposition. C'est, en somme, le procédé employé par les teinturiers, qui suspendent, au milieu de la masse de liquide en ébullition, un chaudron, où viennent se réunir les sels et impuretés du bain de teinture.

M. S.-L. Dulac, de Paris, dont le nom est déjà revenu à plus d'une reprise dans le présent chapitre, s'est occupé de cette question avec beaucoup de suite et de succès. Il estime, avec raison, qu'aux températures ordinaires des chaudières fixes, la précipitation des sels est incomplète et insuffisante, et, à l'action de la chaleur, il ajoute celle de réactifs chimiques. Ces réactifs varient naturellement avec la composition des eaux d'alimentation. Dans le bassin parisien, c'est surtout la soude que M. Dulac recommande. Pour recueillir les précipités ainsi formés, il immerge, à l'intérieur de la chaudière, des compartiments ou boîtes légères en métal, ouvertes par le haut, fermées par le bas, et qui sont tenus, par des saillies convenables, à distance de la surface vaporisante; pour éviter les ébullitions qui pourraient se produire au moment de l'ouverture brusque de la prise de vapeur, et auraient pour effet de projeter dans l'eau de la chaudière les dépôts boueux déjà rassemblés, M. Dulac munit l'ouverture des collecteurs d'un petit clapet très léger, qui se ferme de lui-même dès que le courant tend à se porter vers l'extérieur. Ces collecteurs sont d'assez petit volume pour qu'on puisse les introduire un à un par le trou d'homme; on les range dans la chaudière et on les tient en place par quelques armatures volantes; quand ils commencent à se remplir, on les retire, on les vide et on les remet en place. La figure 67 ci-contre représente un collecteur Dulac superposé à un tube de chaudière Field; cet agencement ingénieux semble bien fonctionner.

Fig. 67. Collecteur S.-L. Dulac.

Depuis quelques années, on pratique plus fréquemment l'épuration des eaux préalablement à leur admission dans la chaudière; cette opération présente des avantages évidents; éloigner à l'avance les matières nuisibles, tel est le but à atteindre. Toutefois, à part quelques tentatives isolées, on a longtemps reculé devant l'emploi de ce procédé si rationnel. En effet, il soulève en application d'assez grosses difficultés pratiques. Ce n'est pas qu'il soit impossible de trouver à bon marché des réactifs convenables, mais, la réaction une fois obtenue, il faut séparer le liquide purifié des précipités formés dans son sein; or ces précipités sont d'une ténuité extrême et tenus en suspension dans une masse d'eau considérable.

Les seuls procédés connus de séparation sont la décantation et la filtration. Mais la décantation, pour être complète, exige que le liquide reste plusieurs jours dans un repos à peu près absolu; l'opération ne peut se faire que dans des bassins de très grand volume, coûtant fort cher et tenant beaucoup de place. Quant à la filtration, elle n'est

guère moins impraticable; les précipités, très volumineux, ne tardent pas à encombrer les filtres et à en boucher les pores; il faut donc, ou bien renouveler très fréquemment les surfaces filtrantes, ou bien leur donner un développement fort coûteux.

Mais si chacune des deux méthodes est le plus souvent impuissante, il n'en est pas de même de leur combinaison. L'idée a fait son chemin depuis une dizaine d'années; l'on voyait à l'Exposition plusieurs appareils destinés à l'épuration de l'eau d'alimentation, et qui, d'après les certificats produits, semblent avoir donné de bons résultats. Les principes de ces divers appareils sont à peu près les mêmes : les réactifs sont mis en dissolution dans des récipients spéciaux; avec les eaux ordinaires, contenant du sulfate et du carbonate de chaux, on se sert le plus souvent de carbonate de soude, qui précipite le sulfate de chaux, et de chaux caustique, qui s'empare de l'acide carbonique libre et rend insoluble le carbonate de chaux neutre.

Les dissolutions, clarifiées par décantation, sont mélangées en proportions convenables avec l'eau à épurer; la réaction se produit immédiatement. Le liquide ainsi préparé est introduit vers le bas d'un gros cylindre vertical, où le courant ascensionnel est très lent; les parties solides provenant de la précipitation se séparent, et la décantation est favorisée par des chicanes; la boue formée est expulsée, de temps à autre, à l'aide de purges. Le liquide, purifié de ses sédiments les plus grossiers et les plus volumineux, continue à s'élever, et rencontre sur sa route le filtre proprement dit; celui-ci est constitué ordinairement par des matières filamenteuses et à bas prix. On fait grand usage, pour cet objet, d'un produit qui a pris, depuis quelques années, une place importante dans l'industrie de l'emballage : c'est la paille de bois, qui remplace, pour de nombreux emplois, le foin et le varech, et qui se fabrique à très bon compte dans des usines spéciales. La matière filtrante, quelle qu'elle soit, est comprimée entre deux cloisons perforées; le liquide à épurer la traverse et y dépose les précipités légers que la décantation n'avait pas séparés; la quantité en est assez minime, de sorte que le filtre peut servir longtemps; lorsqu'il commence à s'obstruer, on le démonte et on renouvelle la matière filtrante.

C'est d'après ces principes que sont établis les appareils épurateurs présentés par M. Gaillet (Paul), de Lille, par MM. Dervaux et Cie, de Farciennes (Belgique), par la Société de l'épuration des eaux industrielles (système Henri Desrumeaux), de Lille, par M. Howatson, de Paris, etc. Ces divers appareils diffèrent entre eux par l'agencement des organes, par les moyens mis en œuvre pour opérer la dissolution et le dosage des réactifs le mélange des dissolutions à l'eau d'alimentation, le réglage du débit, par les procédés de purge des boues et de renouvellement des filtres, par la disposition des chicanes, etc.

La division en deux temps de la séparation des précipités repose sur une idée rationnelle et pratique; aussi les appareils épurateurs que nous venons de décrire comptent-ils déjà un assez grand nombre d'applications. Mis entre des mains soigneuses et exercées, ces appareils semblent devoir donner de bons résultats. Néanmoins on ne saurait

encore considérer la question comme complètement résolue, car il reste toujours un point délicat, c'est le dosage des réactifs; le degré d'impureté des eaux naturelles varie dans des limites étendues, non seulement d'une source à une autre, mais encore, pour une même nappe, d'un jour et souvent d'une heure à l'autre; la teneur des mélanges doit suivre toutes ces variations. La chose n'est sans doute pas impossible, et l'on peut s'en tirer avec du soin, de l'attention et quelques vérifications assez simples; mais on ne peut se dissimuler qu'il y a là une véritable difficulté, qui n'est pas encore surmontée.

Les usages de la vapeur d'eau se sont tellement multipliés dans les dernières années écoulées, et l'emploi de ce fluide s'est étendu à des applications si variées, qu'il a fallu, pour répondre aux conditions nouvelles, créer de nombreux accessoires de chaudières ou modifier ceux existant précédemment. Ces appareils s'adaptent, soit sur les générateurs, soit sur les conduites de vapeur. Presque tous fort ingénieux comme conception ou comme agencement, ils constituent un sujet d'étude d'un véritable intérêt. Nous les classerons sous les rubriques ci-après :

Régulateurs de pression; régulateurs d'alimentation; détendeurs de vapeur; purgeurs automatiques; clapets automatiques de vapeur; appareils divers.

En étudiant les dispositions générales du générateur Belleville, nous avons eu l'occasion de faire remarquer quelles conditions exceptionnelles de marche résultaient, pour les chaudières de ce système, du faible volume d'eau qu'elles renferment. Les variations qui se produisent, soit dans la pression, soit dans la quantité d'eau, sont trop rapides pour pouvoir être contrôlées autrement que par des appareils agissant automatiquement, sous l'action des phénomènes dont il est nécessaire de limiter les excursions. La chaudière Belleville est toujours munie des appareils automatiques ci-après : un régulateur de pression, un régulateur d'alimentation et un détendeur de vapeur.

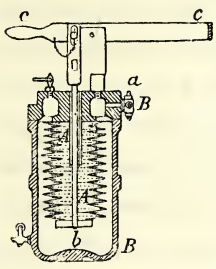


Fig. 68.
Régulateur de pression, système Belleville.

Le régulateur de pression (fig. 68) n'est autre chose, en principe, qu'un piston chargé par un ressort, et mis en relation avec la chaudière; les variations de la pression se traduisent par des déplacements du piston, lesquels, à leur tour, se transmettent, par un système de leviers, jusqu'au registre; de telle sorte que, lorsque la pression tend à augmenter, le registre se ferme et le tirage soit diminué. Le registre lui-même est en forme de clef de poêle et oscille, sans résistance notable, autour de son axe de figure.

Le piston et le ressort forment un ensemble d'une disposition particulière et ingénieuse, qui le met à l'abri des causes de grippement. On connaît le système de ressorts imaginé par M. Belleville; ils sont composés de feuilles d'acier, façonnées en rondelles, et légèrement embouties en forme de troncs de cône très plats et ouverts sur leurs deux bases; superposons deux de ces rondelles en accolant entre elles les deux bases

larges, nous aurons un élément de ressort; plusieurs éléments semblables empilés constituent un ensemble élastique, pouvant supporter de très grands efforts. Pour l'application au régulateur de chaudière (fig. 68), on interpose entre deux rondelles des anneaux de caoutchouc formant joint; on obtient ainsi une sorte de vase étanche *AA*, qui peut se déprimer sous l'action d'une pression extérieure; le tout est renfermé dans un récipient en fonte *BB*, mis en relation avec la chaudière par le robinet *a*; les mouvements de la plaque de base *b* sont communiqués au registre par l'intermédiaire du levier *CC* et d'une série de transmissions faciles à imaginer.

De même que la pression, l'alimentation est réglée, dans les chaudières Belleville, par un appareil automatique. A cet effet, une bouteille en fonte *A* (fig. 69) est mise en communication haut et bas avec la chaudière; l'eau, tranquille dans cette bouteille, s'y établit à un niveau qui est en relation avec la quantité d'eau que contient la chaudière; si cette quantité augmente, le niveau s'élève dans la bouteille. Ces mouvements sont suivis par un flotteur *B* et communiqués, par un système de leviers facile à lire sur la figure, à la petite soupape *a*. Le jeu de cette soupape, qui gouverne l'alimentation, mérite d'être décrit.

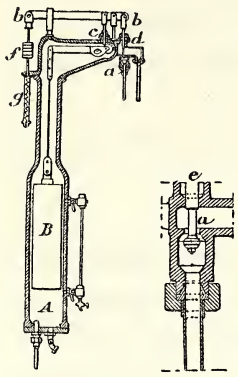


Fig. 69.
Régulateur d'alimentation, système Belleville.

On sait que l'eau est délivrée aux chaudières Belleville par une pompe sans volant, dont les organes marchent lentement et n'ont qu'une fort petite masse; cette pompe ralentit son mouvement et même s'arrête tout à fait lorsque la conduite de refoulement est étranglée ou fermée. Tel est l'objet de la soupape *a*; elle est disposée sur le trajet du tuyau conduisant l'eau de la pompe à la chaudière; les mouvements du flotteur *B* ont pour résultat d'étrangler plus ou moins le refoulement, et, par conséquent, de modérer la vitesse de la pompe à la demande du niveau d'eau dans la bouteille *A*.

Pour assurer d'une manière certaine le fonctionnement de cet organisme délicat, on a dû accumuler bien des précautions ingénieuses. Le levier principal *bb* étant extérieur à l'appareil, il a fallu, pour le mettre en relation, d'une part avec le flotteur, d'autre part avec la soupape régulatrice, traverser deux fois à joint étanche la paroi; les deux presse-étoupe *c* et *d* reçoivent un bourrage métallique spécial, ne donnant que des frottements extrêmement doux. La tige *e* de la soupape a été engraissée, de manière à équilibrer les pressions. Le flotteur est soutenu par un double système antagoniste : le ressort *g*, qui est permanent, et le contrepoids *f*, constitué par des rondelles en plomb amovibles, et dont on règle le nombre par tâtonnement, suivant la hauteur à laquelle on veut maintenir le niveau dans la bouteille. En service, si l'appareil est tenu en bon état, le fonctionnement est doux et régulier, les oscillations du plan d'eau sont faibles, la pompe ralentit son mouvement, s'arrête et repart, en suivant sans hésitation les variations de la fourniture de vapeur demandée à la chaudière.

La chaudière Belleville comporte également un détendeur de vapeur; le principe de cet appareil est fort simple; nous aurons à décrire des détendeurs qui s'en rapprochent beaucoup.

M. V. Cleuet, de Paris, construit des régulateurs d'alimentation fondés sur un principe fort ingénieux. Redoutant, non sans raison, les effets des frottements des presse-étoupe, qui troublent et paralysent si souvent le jeu des appareils analogues, lorsqu'ils sont gouvernés par un simple flotteur, M. Cleuet a cherché à obtenir des actions plus énergiques, et il a eu recours aux efforts très considérables qui résultent de la dilatation des métaux. Un tube en laiton *AA* (fig. 70), d'une longueur suffisante, est fixé dans une

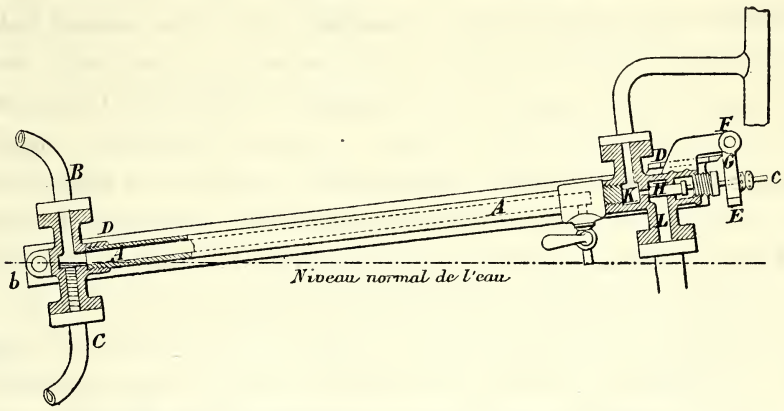


Fig. 70. — Régulateur d'alimentation, système V. Cleuet.

position inclinée le long de la chaudière; le bas du tube est placé à la hauteur moyenne du plan d'eau, et communique avec l'eau et la vapeur par les deux conduites *B* et *C*. Lors donc que le niveau dans la chaudière est à sa hauteur normale, le tube *A* est plein de vapeur, et par conséquent à haute température. Si le plan d'eau vient à s'élever, le tube se remplit d'eau, la chaleur se dissipe promptement par rayonnement, le tube se contracte, et cette contraction est utilisée pour ouvrir un dégorgement à la pompe alimentaire, laquelle ne cesse pas de fonctionner. A cet effet, le tube est fixé par le bas, au moyen d'une vis, sur la règle en fer *DD*, dont la température, et par suite la longueur, peuvent être considérées comme constantes. Le levier *FE* s'appuie sur le couteau *G*, solidaire de la règle *DD*, et est manœuvré par l'articulation *F*, solidaire du tube *AA*; les oscillations de ce levier sont transmises à la soupape *H*, laquelle est appuyée sur son siège par un fort ressort antagoniste; la conduite alimentaire arrive en *K* en dessous de cette soupape. La contraction du tube *AA* aura donc pour résultat d'entr'ouvrir la soupape *H* et, par suite, de permettre le retour à la bâche d'une partie de l'eau d'alimentation par le dégorgeoir *L*.

Les détendeurs de vapeur ont pour objet, ainsi que leur nom l'indique, de régler et

de maintenir constante la pression de la vapeur qui doit agir sur le piston d'une machine ou sur un organisme quelconque. Interposé sur le trajet d'une conduite de vapeur, cet appareil produit un étranglement amenant une chute de pression; les choses sont disposées de telle sorte, que l'orifice étranglé se rétrécisse automatiquement dès que la pression à l'aval tend à s'élever; ce résultat est obtenu à l'aide d'un piston, qui commande l'obturateur d'étranglement; ce piston reçoit, sur une de ses faces, la pression de la vapeur dans la partie aval de la conduite, et, sur l'autre face, la charge antagoniste d'un contrepoids ou d'un ressort.

Ces appareils sont devenus d'un usage courant dans ces dernières années. Employés avec les chaudières à très faible volume, ils répriment efficacement les écarts inévitables de la pression; de plus, ils délivrent à la machine une vapeur à pression modérée, les hautes pressions étant réservées pour la chaudière, dont elles assurent le fonctionnement régulier. Les détendeurs permettent de brancher sur une même conduite des générateurs produisant la vapeur sous des pressions différentes, et, inversement, des appareils ne devant admettre que de basses pressions. Cette dernière application est fort répandue dans les teintureries, blanchisseries, chauffages et autres industries où la vapeur est employée comme véhicule de chaleur. Mais, pour ces sortes d'emplois, il importe d'observer certaines précautions, dont l'omission a causé, à plus d'une reprise, de graves accidents. L'obturateur d'étranglement, organe fondamental du détendeur, doit jouer librement et facilement, faute de quoi le fonctionnement de l'appareil est irrégulier; cet obturateur ne saurait donc faire joint étanche; même lorsqu'il est complètement fermé, il donne lieu à des fuites de vapeur. Si donc, par suite d'une circonstance quelconque, la dépense de vapeur à l'aval du détendeur se trouve supprimée, l'équilibre de pression s'établit très promptement de part et d'autre de l'appareil. Dans les installations où, sur une conduite à haute pression, on a branché des récipients de résistance limitée, l'interposition de détendeurs sur les conduites de branchement ne saurait en aucune façon empêcher les explosions; il est encore nécessaire d'installer, à l'aval des détendeurs, des dispositifs propres à limiter absolument la pression, même quand le débit de vapeur se trouve complètement interrompu, par exemple, des soupapes de sûreté faiblement chargées.

M. Legat, de Paris, qui s'est fait connaître par plusieurs dispositifs ingénieux applicables aux canalisations de vapeur, expose un détendeur, qui est une modification heureuse de l'appareil analogue qui figurait à l'Exposition de 1878. L'organe obturateur est une soupape équilibrée *AA* (fig. 71); il est, par l'intermédiaire de la tige *a*, solidaire de la plaque *B* qui reçoit la pression de la vapeur détendue; à cet effet, cette plaque forme le fond d'un vase *cc*, constitué par une membrane plissée et extensible, qui n'oppose aucun obstacle au mouvement de la plaque; le bord supérieur du vase est pincé dans un joint fixe; le guidage *b* de la tige *a* est libre; le vase *cc* se remplit d'eau de condensation, formant un frein modérateur, qui assure la douceur des mouvements.

La tige *a* est soutenue, à l'aide de la traverse *DD*, par les deux ressorts *FF*. Pour faire varier la pression de la vapeur détendue, on agit sur ces ressorts par le volant à vis *GG*.

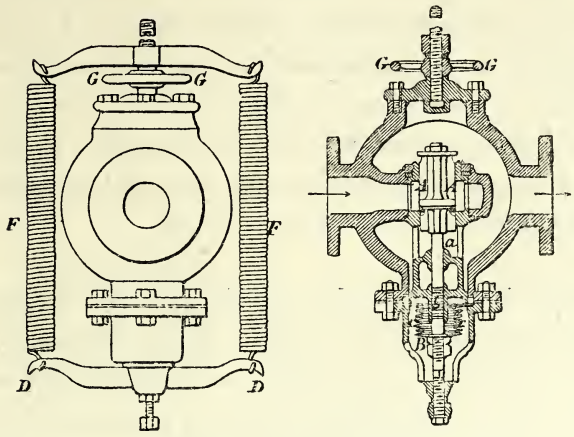


Fig. 71. — Robinet détendeur automatique, système Legat.

Dans le détendeur de M. Lencauchez, de Paris, l'organe obturateur est un tiroir cylindrique, entaillé sur son bord, et présentant au passage de la vapeur des sections triangulaires, qui croissent rapidement suivant une loi parabolique, au fur et à mesure de la levée du tiroir.

La Compagnie continentale des locomotives sans foyer, de Paris, a appliqué, depuis plusieurs années, à ses machines des détendeurs, imaginés par M. L. Francq, et qui fonctionnent dans des conditions particulières. On connaît le principe des locomotives sans foyer, inventées en 1873 par le docteur Lamm : la chaudière ordinaire de locomotive est remplacée par un simple réservoir, en partie rempli d'eau chaude; cette eau fournit, en se refroidissant, la chaleur nécessaire à la production de la vapeur consommée par la machine. Le réservoir étant chauffé au préalable à une température d'environ 200 degrés, qui correspond à une pression de 15 kilogrammes, la locomotive se trouve chargée et prête à partir; au fur et à mesure qu'elle effectue son trajet, la température de l'eau va en baissant, en même temps que la pression de la vapeur. Or il importe, au point de vue de l'utilisation économique de la chaleur, particulièrement nécessaire au cas actuel, que la vapeur soit délivrée à la machine sous une pression à peu près constante, quoique la pression au réservoir soit essentiellement variable. C'est pour cet objet qu'a été imaginé le détendeur dont la figure 72 représente la disposition.

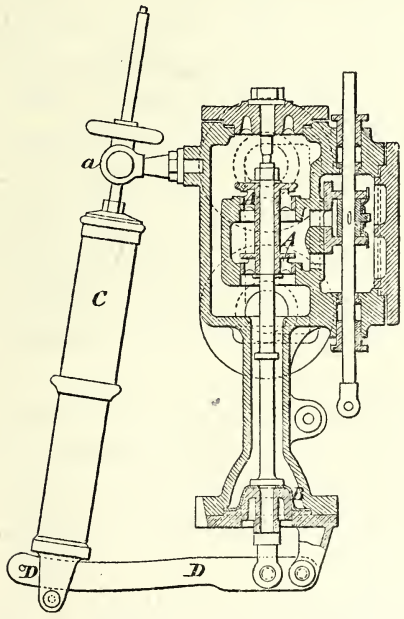


Fig. 72. — Régulateur détendeur de vapeur, système Francq et Mesnard.

L'obturateur est une soupape *AA* à deux sièges d'égal diamètre; grâce à un artifice de construction (soupape supérieure rapportée), on a pu donner à ces deux sièges un égal diamètre, ce qui procure un équilibre complet, et même une étanchéité satisfai-

IMPRIMERIE NATIONALE.

sante quand l'obturateur est fermé; le piston *B*, sur lequel agit la pression de la vapeur détendue, est rendu étanche sans frottement par une membrane de caoutchouc; ce piston est placé au bas d'une assez haute colonne, de sorte qu'il est toujours baigné par l'eau tiède de condensation; la poussée est contre-balancée par une balance à ressort *C*, montée sur le pivot fixe *a*, et dont le bas parcourt la glissière *DD*, de telle sorte qu'en mettant en prise la balance avec divers points du levier, le mécanicien puisse instantanément faire varier l'effort qui agit sous le piston *B* et, par suite, la tension de la vapeur, suivant les accidents de la route.

Une des difficultés de construction que l'on rencontre dans tous les appareils de cette nature, c'est le joint du piston, lequel doit être à la fois étanche et sans frottement. Pour la tourner, on a recours à divers procédés : récipients à parois déformables (Legat), diaphragme en caoutchouc (Francq), etc. M. Deniau applique à ses détendeurs, exposés par la maison Vve Louis Giguet, de Saint-Denis (Seine), un artifice qui a déjà reçu d'autres applications : le piston est très long, ajusté librement, sans garniture, et il porte sur son pourtour un grand nombre de cannelures.

Dans les canalisations de vapeur souvent fort développées, qui sont en service dans diverses industries, les eaux résultant de la condensation du fluide apportent des perturbations fâcheuses : l'écoulement de la vapeur se trouve gêné; l'eau est entraînée et projetée dans les appareils, où elle peut produire des désordres graves. Pour éviter ces inconvénients, on donne à la conduite un tracé comportant des pentes et contre-pentes; à chaque point bas, on dispose un récipient, qui reçoit les eaux de condensation; de temps à autre ce récipient est vidé à l'aide d'un robinet. Ces appareils reçoivent le nom de *purgeurs;* dans certains cas, la manœuvre du robinet est automatique et se fait d'elle-même, dès que le récipient se trouve rempli; le purgeur est alors appelé *automatique.* L'usage des purgeurs automatiques s'est beaucoup étendu depuis quelques années. Ces appareils sont en général assez simples; mais pour que le jeu en soit sûr, il est nécessaire de prendre quelques précautions.

Dans les types les plus répandus, la manœuvre de l'obturateur de purge est faite par un simple flotteur, qui suit les mouvements de l'eau dans le récipient. L'effort que peut produire un flotteur étant assez faible, les organes à mouvoir doivent offrir peu de résistance; M. Legat se sert, comme obturateur, d'une soupape équilibrée; d'autres constructeurs ont recours à un tiroir de faible dimension.

Voici (fig. 73) un appareil ingénieux, imaginé également par M. D. Legat, et qui repose sur un principe un peu différent.

Le flotteur est constitué par un seau *A* porté par un bout de tuyau rigide *BC*, lequel oscille autour de l'axe *C*. Cet axe est constitué par la clef d'un robinet équilibré, disposé de telle sorte que ce robinet soit ouvert quand le seau est dans sa position inférieure, et se ferme quand le seau s'élève; le robinet *C* communique d'ailleurs avec le

dégorgoir *D*; la vapeur chargée d'eau arrive en *E* dans le récipient qui constitue la cage de l'appareil.

Le seau étant au bas de sa course, la vapeur s'échappe par le robinet *C* et le dégorgeoir *D* en déposant dans le récipient l'eau qu'elle entraîne; le seau *A* est peu à peu soulevé par cette eau, et l'échappement se ferme; quand le seau est au haut de sa course, le niveau de l'eau continue à s'élever, puis elle s'écoule par-dessus les bords du seau, qu'elle remplit; sous l'action de cette charge, celui-ci s'abaisse, et l'eau qui le remplit est refoulée par le tuyau *BC* et le dégorgeoir *D*. Les dispositions de détail, indiquées par la figure, sont bien comprises; la construction est simple et ingénieusement conçue.

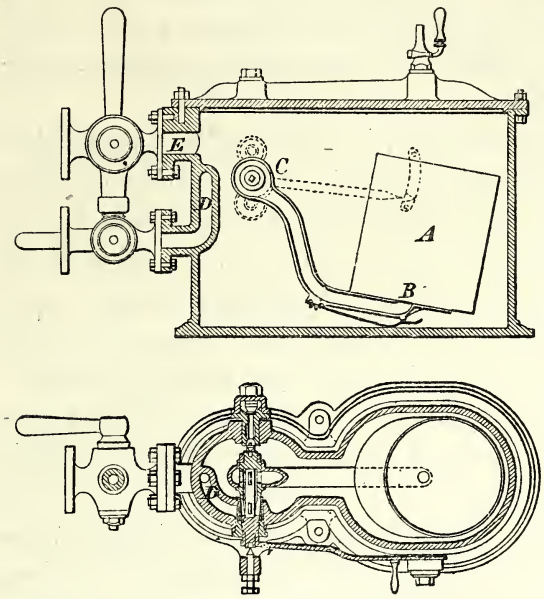


Fig. 73. — Purgeur automatique, système D. Legat.

Nous avons décrit précédemment (page 143) le régulateur d'alimentation imaginé par M. Cleuet, de Paris, et dont le fonctionnement repose sur la dilatation d'un métal sous l'action des variations de température.

Le même principe a été appliqué par M. Cleuet dans la construction d'un purgeur automatique : l'appareil est constitué, comme le régulateur d'alimentation, par un tube en laiton et une règle en fer; seulement, au lieu d'être incliné, le système est placé debout; le tube est mis, par le haut, en communication avec la conduite à purger et porte, dans le bas, une soupape à ressort; cette soupape s'ouvre au dégorgeoir lorsque le tube devient froid, ce qui arrive rapidement dès qu'il est rempli d'eau sur une certaine hauteur. Le purgeur Cleuet jouit d'une propriété intéressante : comme la soupape d'évacuation reste ouverte aussi longtemps que le tube est froid, il en résulte que la fermeture n'a lieu que lorsque la vapeur qui parcourt la conduite a acquis sa température normale; par conséquent, lors de la mise en pression de la canalisation, cette soupape restera ouverte aussi longtemps que l'air contenu dans la conduite n'aura pas été expulsé.

M. A. Véry, de Paris, a également combiné un purgeur automatique fondé sur le principe de la dilatation des métaux.

Le 29 juin 1886, un décret a été promulgué en France, dans le but de prévenir ou du moins d'atténuer les conséquences des accidents qui peuvent se produire dans les grands ateliers mécaniques, et en particulier dans les usines métallurgiques, lorsque

plusieurs chaudières sont branchées sur une même conduite de vapeur. Ces dispositions nouvelles furent prises à la suite de deux terribles explosions, survenues à quelques mois d'intervalle, dans des conditions presque identiques. Dans les deux cas, une chaudière, chauffée par les flammes perdues d'un four métallurgique, s'étant déchirée, la conduite générale de vapeur avait été rompue, et les autres générateurs attelés sur la même conduite avaient émis des torrents de vapeur qui, s'échappant par les ouvertures béantes, s'étaient répandus dans les halles, en avaient rendu l'atmosphère irrespirable et avaient fait de nombreuses victimes.

Pour prévenir le retour de pareilles catastrophes, le décret précité a rendu obligatoire, pour les grandes batteries de chaudières groupées sur une même conduite, l'usage de certains appareils, ayant pour objet d'interrompre l'écoulement de vapeur, dès qu'une des chaudières constituant le groupe vient à se rompre. Ces appareils ont reçu le nom de *clapets automatiques de vapeur*. Ce n'est pas la première fois que ces appareils faisaient leur apparition. Justement émus des dangers que fait courir au personnel la présence de ces groupes de chaudières, qui contiennent des quantités énormes d'eau chaude, plusieurs industriels avaient jugé prudent de munir les conduites de clapets capables, en cas d'accident, d'isoler les chaudières demeurées intactes. Toutefois les installations de cette nature étaient restées à l'état d'exception.

L'ensemble des chaudières constituant une batterie, de la conduite générale et des branchements forme une vaste capacité, contenant de la vapeur sous pression et de l'eau chaude. Si une rupture vient à se produire en un point quelconque de la paroi, non seulement la vapeur présente fait irruption, mais il en est de même des quantités beaucoup plus importantes de vapeur que peut émettre l'eau, jusqu'à ce que sa température se soit abaissée à 100 degrés, température correspondant à la pression atmosphérique.

Pour limiter cette émission de vapeur, on installe, en des points choisis, des obturateurs à jeu automatique, qui ferment spontanément les conduites dès qu'une rupture survient, c'est-à-dire aussitôt qu'il se produit un courant de vapeur dépassant les vitesses admises en service. Le cantonnement de la capacité totale en sections de volume restreint a pour effet d'atténuer efficacement les dangers de brûlure et d'asphyxie.

Quelques mois à peine nous séparent de l'époque où les clapets de vapeur sont devenus obligatoires pour les installations prévues au décret de 1886; et déjà cependant plusieurs cas d'explosion se sont produits, dans lesquels ces appareils ont fonctionné efficacement et réduit à des proportions minimes des accidents qui fussent devenus désastreux et auraient fait de nombreuses victimes.

Un clapet de vapeur peut être disposé de manière à se fermer, soit dans le sens habituel du courant de vapeur, soit contre ledit courant, soit dans les deux sens; de là trois types caractéristiques.

Premier type. — Fermeture en sens contraire du courant de vapeur. — Les clapets de ce type sont d'une grande simplicité; une légère soupape fermant par son poids rem-

plit le but; à l'état de service normal, elle est soulevée et détachée de son siège par le courant de vapeur qui la traverse; si le courant change de sens, la soupape se referme immédiatement. On a donné aux clapets de ce type le nom de *clapets battants*. Ils s'établissent sur chacun des branchements qui réunissent les chaudières à la conduite générale. En les installant sur le générateur, au départ du branchement, et les complétant par un volant à vis, qui appuie la soupape sur son siège, on peut les transformer en soupapes d'arrêt de vapeur; mais, pour les raisons qui vont être exposées, cette transformation n'est pas à recommander.

Si l'une des chaudières composant une batterie vient à se déchirer, la pression tombant rapidement au-dessous du clapet, celui-ci se ferme et isole le reste de la batterie. Mais il n'en est plus ainsi si le clapet lui-même est emporté ou endommagé par l'explosion; en pareil cas, les autres chaudières ne cesseront d'envoyer leur vapeur, qui jaillira par le branchement de la chaudière rompue; le système perdrait également toute son efficacité, si la conduite générale venait à s'ouvrir.

Le type dont il s'agit ne doit donc être considéré comme satisfaisant que dans les installations où tous les clapets de vapeur sont mis complètement à l'abri des effets de la rupture des chaudières et où la conduite générale de vapeur ne court aucun risque d'être endommagée.

Deuxième type. — Fermeture dans le sens du courant de vapeur. — Les clapets de ce type doivent être, en service normal, tenus, par un poids ou un ressort, éloignés de leur siège contre le courant de vapeur qui tend à les fermer; ce n'est que dans le cas d'un courant plus intense, déterminé par une rupture, qu'ils doivent se fermer. Ils sont donc plus délicats que ceux du premier type, moins simples de construction et, de plus, pour peu que l'effort antagoniste soit mal calculé, ils peuvent donner lieu, en service courant, à des fermetures intempestives. Mais, d'un autre côté, ils présentent cet avantage, qu'en cas de rupture, soit dans la conduite générale, soit dans l'une quelconque des chaudières, tous les clapets se ferment et isolent les chaudières intactes.

Troisième type. — Fermeture dans les deux sens. — La soupape mobile est comprise entre deux sièges, et s'appuie contre l'un ou l'autre, suivant le sens du courant. Ce type réunit en partie les avantages et les inconvénients des deux types précédents. On peut, par une répartition convenable des charges, rendre l'appareil beaucoup plus sensible dans un sens que dans l'autre, de telle sorte qu'il fonctionne comme clapet battant du côté de la chaudière.

Quel que soit le type auquel il se rapporte, tout clapet automatique de vapeur doit satisfaire à certaines conditions que l'on peut résumer de la manière suivante :

1° La fermeture doit se faire d'elle-même et sûrement, aussitôt qu'il se produit, entre l'amont et l'aval de l'appareil, une différence de pression notable; cependant la fermeture ne doit pas se faire pour les dépressions légères qui ont lieu en service courant, même à l'occasion des tirages importants de vapeur;

2° La fermeture ne doit pas être étanche, l'équilibre des pressions doit se rétablir de lui-même, et l'obturateur doit démasquer son orifice dès que l'écoulement de la vapeur est supprimé; de telle sorte qu'en cas de fermeture intempestive, il soit facile, par la simple manœuvre du robinet d'arrêt, de remettre les choses en état;

3° L'appareil doit être disposé de telle sorte, qu'une fois réglé, il devienne impossible d'en paralyser le jeu de l'extérieur ou d'en modifier la sensibilité; sinon il serait exposé aux entreprises des ouvriers, qui pourraient être tentés de faire disparaître la trace de fausses manœuvres;

4° Il importe que le jeu de l'appareil ne puisse pas être entravé par le tartre, les frottements ou le coincement des organes;

5° Enfin la construction doit être simple, solide et économique.

Le décret de 1886 ne prévoit l'établissement de clapets de vapeur que dans les installations de batteries comportant des chaudières à grand volume; pour les premières applications d'un appareil nouveau, on a tenu à ne réglementer que les cas où la sécurité publique se trouvait en jeu d'une façon indiscutable. Mais il est d'autres circonstances où il est nécessaire de se prémunir contre les dangers de l'épandage de la vapeur; citons, à titre d'exemple, ces usines électriques, installées dans des sous-sols plus ou moins étroits et où se trouve concentrée une force motrice considérable; ces installations, si nombreuses aujourd'hui, comportent de puissantes batteries de générateurs; il est vrai que l'on choisit des chaudières à petits éléments, qui ne contiennent qu'un faible volume d'eau; néanmoins, en cas de rupture, la quantité de vapeur émise serait suffisante pour remplir, et au delà, les locaux fort restreints dans lesquels l'usine est établie, et transformer en catastrophe un incident insignifiant; il est donc de la prudence la plus élémentaire de munir chaque chaudière d'un clapet de vapeur; et, en pareil cas, l'Administration ne manque pas de prescrire cette mesure de sûreté, en échange des tolérances qu'elle accorde et sans lesquelles la création de l'usine eût été rendue impossible.

Ce n'est pas sans dessein que nous avons insisté sur les principes qui entrent en jeu dans la construction et le fonctionnement des clapets de vapeur. D'une part, ces appareils constituent une véritable nouveauté en matière d'accessoires de chaudière; car il en était à peine question lors de l'Exposition de 1878. En second lieu, la pratique a montré, par des expériences douloureuses et répétées, qu'ils pouvaient ajouter beaucoup à la sécurité des batteries de chaudières; et c'est la considération qui a décidé l'Administration à intervenir par voie de règlement, et à rendre obligatoire, dans certains cas, une mesure qui jusqu'alors était restée purement facultative. Enfin il n'était pas inutile de préciser les services que ces appareils ont à rendre, ainsi que les principes qui président à leur fonctionnement et qui sont parfois méconnus par ceux qui les établissent ou qui ont à s'en servir.

Passons rapidement en revue quelques-uns des clapets automatiques de vapeur qui figuraient à l'Exposition.

Comme exemple du premier type, on peut citer l'appareil de MM. Francq et Mesnard exposé par la Compagnie continentale des locomotives sans foyer, de Paris. Ainsi qu'on peut le voir par la figure 74, cette soupape est munie d'un volant à vis, qui en fait un robinet d'arrêt.

M. Lucien Pasquier propose un appareil (fig. 75) qui ressemble beaucoup, comme principe, au précédent; l'obturateur est une soupape, qui peut être appuyée sur son

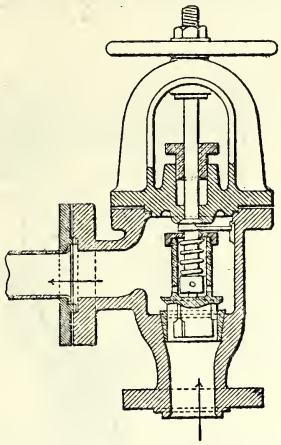


Fig. 74. — Robinet à soupape de retenue, système Francq et Mesnard.

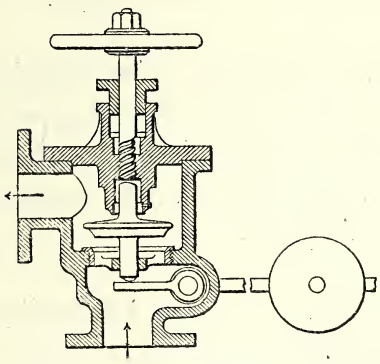


Fig. 75. — Clapet-robinet de retenue de vapeur, système L. Pasquier.

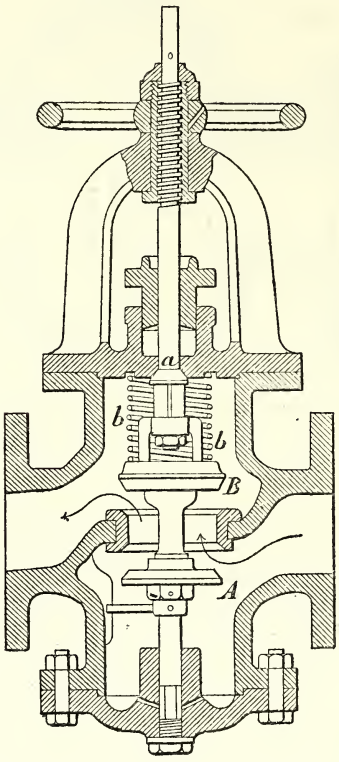


Fig. 76.
Robinet à clapet automatique, système Colombier.

siège par un volant à vis. L'inventeur a jugé utile de tenir la soupape soulevée au moyen d'un contrepoids extérieur.

Comme clapet du second genre, se fermant dans le sens du courant habituel de vapeur, nous citerons l'appareil présenté par M. P. Colombier, de Paris (fig. 76). Le clapet *A* est solidaire d'une valve d'arrêt *B*, laquelle est manœuvrée par un volant à vis; l'ensemble joue sur la tige *a* du volant et peut se déplacer verticalement par

rapport à elle ; le clapet *A* est tenu ouvert par son propre poids et par l'action du ressort *bb*, lequel est très doux et peu tendu.

M. Fontaine, constructeur à la Madeleine-lès-Lille (Nord), expose un clapet à double effet (fig. 77); c'est une plaque métallique oscillant librement autour d'un axe horizontal entre deux sièges inclinés, et pouvant, suivant le sens du courant de vapeur, s'appliquer sur l'un ou l'autre de ces sièges. Comme l'appareil ainsi établi serait d'une sensibilité excessive et se fermerait sous l'action de courants très faibles, M. Fontaine

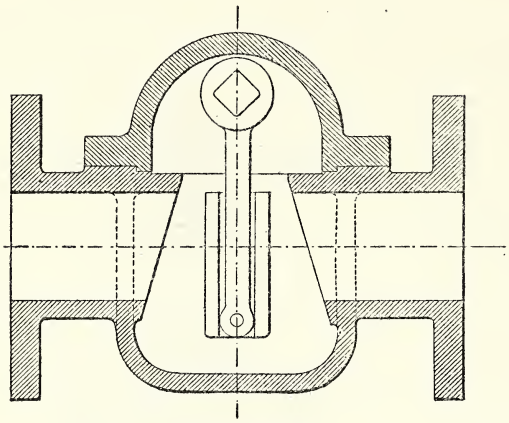


Fig. 77. — Clapet de retenue de vapeur, système Colombier.

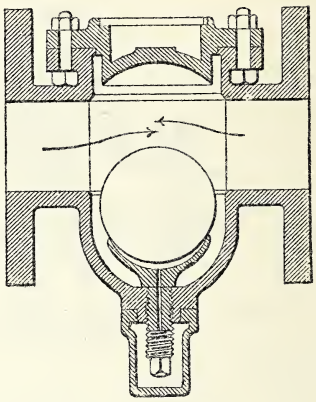


Fig. 78. — Clapet de retenue de vapeur, système Labeyrie.

établit, sur l'axe du clapet, des contrepoids calculés de manière à n'être entraînés que dans le cas de dépressions notables. Mais, pour obtenir cette amélioration nécessaire, il a fallu prolonger l'axe du clapet en dehors de la paroi de la boîte en fonte qui contient l'organe mobile, c'est-à-dire recourir à un presse-étoupe, dont les frottements peuvent amener des perturbations dans le jeu de l'appareil.

M. Paul Carette, d'Hamégicourt (Aisne), a combiné des clapets à deux sièges, qui ont beaucoup d'analogie avec le précédent appareil.

Le clapet automatique imaginé par M. Pile, de Paris, est constitué par un piston, avec distribution automatique par des soupapes, qui s'ouvrent d'elles-mêmes par l'effet des dépressions qui se produisent dans la conduite de vapeur.

Nous terminerons cette étude par la description d'un appareil fort simple, inventé par M. L. Labeyrie, garde-mines à Paris, et construit par M. G. Dupuch. C'est un boulet creux (fig. 78), posé dans une cavité ménagée sur le parcours de la conduite de vapeur; un courant de vapeur un peu violent le soulève et l'applique sur l'un des deux sièges

disposés de part et d'autre. Le procédé employé pour régler la sensibilité de l'appareil est fort ingénieux. Le boulet repose sur une coupe mobile, qu'on peut élever à volonté à l'aide d'une tige filetée; le réglage se fait par tâtonnements sur l'appareil mis en place; une fois obtenue la sensibilité désirée, on coiffe d'un écrou borgne la tête de la tige filetée, et, en scellant cet écrou, on met l'appareil à l'abri d'une tentative d'altération. Si l'on veut que la sensibilité soit inégale dans les deux sens, il suffit de donner à l'ensemble une position inclinée. Cet appareil simple et ingénieux semble répondre à la plupart des conditions du programme qui a été précédemment tracé.

Pour terminer l'étude des accessoires de chaudières, il nous reste à parler de quelques appareils qui ne rentrent dans aucune des catégories que nous avons examinées ci-dessus.

M. Fontaine, à la Madeleine-lès-Lille (Nord), expose des fonds de bouilleurs en tôle emboutie, avec trou d'homme repoussé à l'intérieur, pièce d'une exécution remarquable. On sait que les fonds de bouilleurs s'exécutent ordinairement en fonte, et qu'ils ont donné lieu à d'assez nombreux accidents; la substitution à la fonte d'un métal malléable constitue une notable amélioration.

L'exposition de M. Lencauchez, de Paris, comprenait un grand nombre d'appareils ingénieux, destinés à faciliter ou améliorer les usages de la vapeur; nous avons déjà eu l'occasion d'en décrire quelques-uns. Celui qu'il désigne sous le nom de *réchauffeur-déjecteur filtrant* a pour objet de réchauffer l'eau d'alimentation, en y faisant passer la vapeur provenant de l'échappement d'une machine sans condensation, et de purifier cette eau après échauffement. L'eau froide est projetée au sommet d'une sorte de château d'eau, constitué par une colonne de plateaux en chicanes; elle descend en cascades, tandis que la vapeur suit le trajet inverse; l'eau réchauffée est recueillie au bas d'un récipient, où elle se décante, pour traverser ensuite de bas en haut un filtre en gravier.

Lorsqu'on vidange une chaudière, les eaux chaudes envoyées sur la voie publique ou dans les égouts émettent des vapeurs qui sont souvent gênantes pour le voisinage. Pour éviter cet inconvénient, M. Péret, de Paris, fait parcourir au courant chargé de vapeurs une série de larges chicanes; dans ce parcours l'eau se refroidit; elle est alors dirigée vers l'égout, tandis que la vapeur s'échappe par une cheminée.

Mentionnons, pour terminer, les outils de nettoyage et de ramonage des chaudières, brosses et écouvillons métalliques, etc., fabriqués dans de bonnes conditions par diverses maisons, notamment par M. Dumas-Gardeux et par Mme Vve A. Beffa, de Paris.

SECTION IV.

FOYERS, FOURNEAUX ET CHEMINÉES.

SOMMAIRE.

Généralités.

Grilles. — Grilles de Créceveur, de Dulac, de Belleville. — Grille à secousse de Wackernie. — Grille à dalles et grille à barreaux immergés de Perret (Michel). — Foyer de Godillot.

Appareils fumivores. — De la fumivorité. — Soufflleur de Belleville. — Foyer Ten-Brinck, perfectionné par Lencauchez. — Grille inclinée de Dulac. — Foyers de Herrmann et Cohen, de Criner.

Fumisterie. — Expositions de diverses maisons.

Cheminées. — Cheminées en brique. — Cheminée en tôle des Ateliers de Creil.

La construction des fourneaux et des cheminées des chaudières a été, pendant longtemps, abandonnée à des industriels subalternes, et ces errements routiniers ont amené de nombreux mécomptes. La chaudière la mieux établie ne saurait donner de bons résultats, si les appareils dans lesquels se dégage la chaleur ne sont pas eux-mêmes installés rationnellement, et si leurs proportions ne sont pas en harmonie avec celles du générateur. La fumisterie est un art d'ingénieur; elle exige des connaissances aussi étendues et un sens pratique aussi développé que n'importe quelle autre construction mécanique; on s'en fera une idée en se rappelant que les meilleurs appareils de chauffage des chaudières ne dépassent guère un rendement de 65 p. 100, autrement dit, que plus du tiers de la chaleur virtuellement contenue dans le combustible est perdue pour l'effet utile. Il y a là une marge étendue pour les perfectionnements. Les industriels commencent à le comprendre, et l'espèce de dédain maladroit qui enveloppait tout ce qui concerne la fumisterie a singulièrement diminué. Des maisons importantes ont fait leur spécialité de la construction des appareils de chauffage; quelques-unes, avec l'aide d'ingénieurs habiles, n'ont pas hésité à entreprendre des recherches coûteuses et de longue haleine. En somme, cette question si importante fait d'année en année de sérieux progrès. Ce n'est pas qu'à l'Exposition on rencontrât, en fait de fumisterie, des inventions bien importantes ou bien originales; en cette matière, il en est comme des autres branches de la mécanique; mais en général on se préoccupe, plus que par le passé, d'avoir des fourneaux bien construits et convenablement proportionnés; et les constructions de cette nature qui se voyaient au Champ de Mars, principalement dans la cour de la force motrice, étaient presque toutes sagement entendues, bien appropriées au service qu'elles avaient à faire; quelques-unes même étaient remarquables par leur aspect élégant et décoratif.

De toutes les parties de l'appareil de combustion, c'est dans les dispositions

des grilles qu'on trouve les tentatives d'innovation les plus nombreuses. Les grilles ordinaires employées sous les chaudières fixes se composent, comme on sait, de barreaux en fonte, portés à leurs extrémités sur des sommiers fixés aux parois du fourneau. Ce système ne laisse pas que de présenter des inconvénients; l'un des plus sérieux est la détérioration rapide des barreaux, qui se rongent sous l'action des scories et se déforment par l'effet des dilatations contrariées. On y obvie en donnant aux barreaux une grande hauteur, de telle sorte qu'ils soient largement baignés et refroidis par le courant d'air froid et par les vapeurs qu'émet la couche d'eau maintenue dans le cendrier.

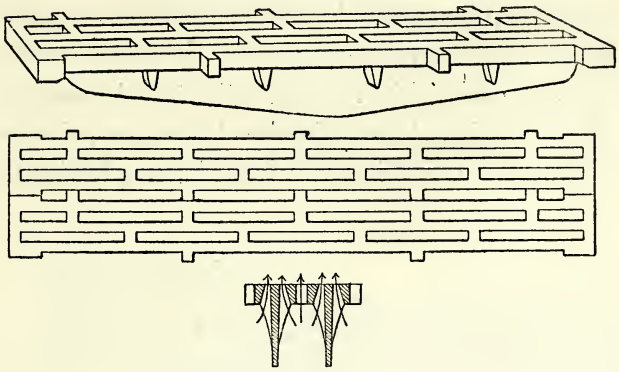


Fig. 79. — Grille Créceveur.

M. J. Créceveur, fondeur à Mantes, présente une grille (fig. 79) dont les éléments sont composés d'un faisceau de trois barreaux fondus ensemble; le barreau central est constitué par une forte nervure qui soutient les barreaux latéraux. Des saillies assurent l'écartement des divers éléments.

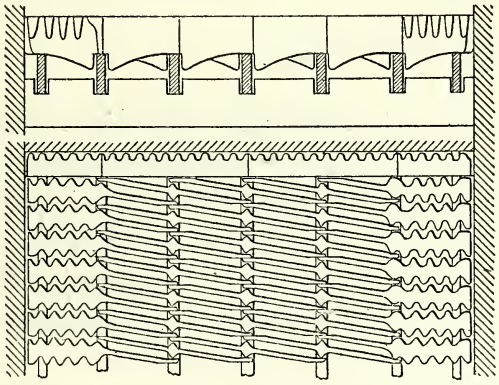


Fig. 80. — Grille S.-L. Dulac.

M. S.-L. Dulac, de Paris, a étudié divers systèmes de grilles, sur lesquels nous aurons à revenir : dans la grille représentée fig. 80, l'auteur s'est surtout préoccupé d'assurer la libre dilatation du métal; une série des sommiers médiocrement espacés supportent de courts barreaux très minces, dont les extrémités, simplement juxtaposées, se dilatent sans obstacle. Le remplacement de l'un quelconque de ces barreaux se fait avec beaucoup de facilité.

La maison Belleville et Cie, de Saint-Denis (Seine), dont nous avons précédemment décrit les générateurs à petits éléments, a adopté des barreaux de grille en tôle de fer ; ces barreaux ont une forme un peu sinueuse, qui ménage les passages d'air et facilite la dilatation; ils sont simples, peu coûteux et durent fort longtemps.

Les houilles grasses et collantes forment, sur les grilles, des gâteaux qui interceptent le passage de l'air; certains charbons donnent des scories semi-fluides, qui s'agglomèrent et bouchent les intervalles des barreaux; dans ces deux cas, la combustion devient défectueuse, et le chauffeur est obligé de travailler son feu au ringard, manœuvre pénible et irrégulière. Pour parer à ces inconvénients, on a imaginé depuis longtemps des grilles à barreaux mobiles, assez usitées en Amérique sous le nom de *rocking grates*.

MM. Wackernie et Cie, de Paris, présentent une grille de ce genre; elle est composée d'éléments juxtaposés, formés chacun de trois barreaux de grille fondus ensemble (fig. 81); à l'aide d'un mécanisme que nous allons décrire, on peut, à volonté, soulever à l'un des bouts, soit les éléments de rang pair, soit les éléments de rang impair; ce mouvement produit, dans le plan de la grille, une série de dénivellations, qui brisent,

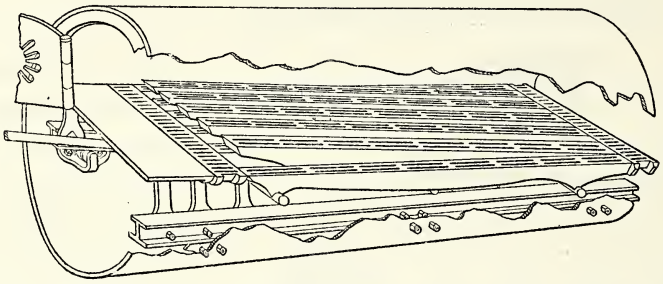


Fig. 81. — Grille articulée Wackernie.

par un effet de cisaillement, la galette de scorie ou de houille agglomérée. Quant au mécanisme, il est fort simple; les éléments de rang pair, par exemple, reposent à l'arrière sur un axe horizontal fixe et à l'avant sur une tringle horizontale, qui peut s'élever ou s'abaisser; pour ceux de rang impair, la disposition est inverse : l'axe fixe est en avant, la tringle mobile en arrière; les deux tringles mobiles sont conjuguées par une transmission sur un levier placé à la main du chauffeur; un seul coup de levier suffit pour manœuvrer le système.

La figure 81 ci-jointe en représente l'application à un foyer intérieur; les éléments impairs sont dans leur position normale et les éléments pairs sont soulevés.

La grille Wackernie a déjà reçu d'assez nombreuses applications, soit dans des installations fixes, soit dans des chaudières de bateaux.

M. Perret (Michel), de Paris, s'est proposé un problème qui, dans bien des cas, présente un véritable intérêt : l'utilisation des combustibles extrêmement pauvres, contenant une très forte proportion de matières stériles, et des combustibles pulvérulents ou décrépitants. Il ne sera pas inutile de rappeler dans quelles circonstances M. Perret a été amené à pousser ses recherches dans cette direction.

Le point de départ de ces études a été la combustion des pyrites, en vue de la fabri-

cation de l'acide sulfurique. Les pyrites sont difficiles à brûler, à cause de la forte proportion de fer qui entre dans leur constitution ; il y a cependant un intérêt considérable à oxyder complètement le soufre qu'elles contiennent, d'abord pour éviter un déchet, et en second lieu pour transformer en matière utilisable les résidus du grillage ; ces résidus, s'ils contiennent encore du soufre, n'ont aucun emploi et sont fort encombrants ; si, au contraire, le soufre a été complètement brûlé, ils constituent un minerai de fer très riche, qui se traite avec avantage dans les hauts fourneaux.

Le problème fut résolu. Ce premier résultat une fois acquis, M. Perret se demanda si les procédés qui avaient réussi pour les pyrites ne pourraient pas être étendus aux combustibles pauvres et pulvérulents, qui sont en général considérés comme de nulle valeur. La question a de l'importance dans tous les cas où il s'agit de rendre utilisable une matière abondante et jusqu'alors stérile. Après bien des essais, M. Perret en est

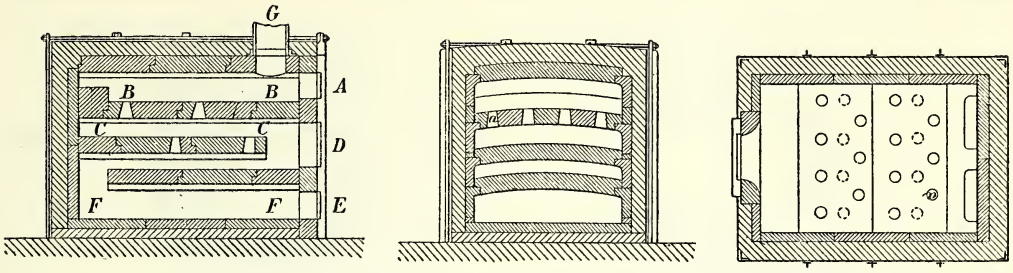


Fig. 82. — Foyer Michel Perret.

arrivé à des dispositifs variés, applicables aux différents cas qui peuvent se présenter. Nous décrirons seulement la grille pour calorifère et la grille pour chaudière.

La grille pour calorifère est faite pour brûler les cendres et escarbilles que l'on retire des cendriers des foyers, et qu'il est d'usage de jeter aux remblais. Ces escarbilles se donnent pour le prix du transport ; elles contiennent, suivant les cas, de 25 à 50 p. 100 de coke et matières combustibles et ne brûleraient pas sur une grille ordinaire. M. Perret soumet cette matière à une circulation méthodique : imaginons un carneau en terre réfractaire, dans lequel le combustible pauvre se déplace dans un sens, tandis que l'air est appelé en sens contraire ; l'air frais, à son entrée dans le carneau, sera riche en oxygène et rencontrera, en premier lieu, les cendres très chaudes, mêlées d'une proportion très petite de particules combustibles ; au fur et à mesure qu'il s'avance dans le carneau, sa température s'élève, ainsi que la richesse du combustible ; mais en même temps la proportion d'oxygène libre devient de plus en plus petite. En définitive, on voit qu'à une extrémité du carneau il sort des cendres à peu près pures et, à l'autre extrémité, un mélange à haute température d'azote et de produits gazeux de la combustion ; c'est le chauffage préalable de l'air par les cendres chaudes qui permet de brûler la faible proportion de combustible pur qui se rencontre dans le mélange.

Le foyer est disposé comme l'indique la figure 82 ; le combustible frais est jeté par

l'ouvreau *A* et étalé à l'aide d'un râble sur la tablette *BB*; lorsqu'il est suffisamment échauffé, on le descend sur la tablette *CC* en le faisant tomber par les trous *aa*, en même temps qu'une couche nouvelle de combustible frais est répandue sur *BB*; on continue de même à faire descendre le combustible de tablette en tablette, en passant le râble par l'ouvreau *D*, tandis qu'on charge toujours sur la tablette supérieure; arrivé sur la sole inférieure *FF*, le combustible est réduit à l'état de cendre chaude, que l'on extrait par la porte *E*. Dans l'intervalle des charges, les ouvreaux *A* et *D* sont fermés par des bouchons métalliques. L'air frais s'introduit par la porte *E*, circule entre les tablettes, et les produits chauds de la combustion s'échappent en *G*.

Pour le chauffage des générateurs de vapeur, auxquels le système ci-dessus décrit ne saurait s'appliquer, M. Perret a imaginé une grille faite spécialement pour les fines maigres ou les charbons décrépitants. On sait combien ces combustibles sont difficiles à brûler dans un foyer ordinaire : ils filtrent à travers les vides de la grille, et si, pour

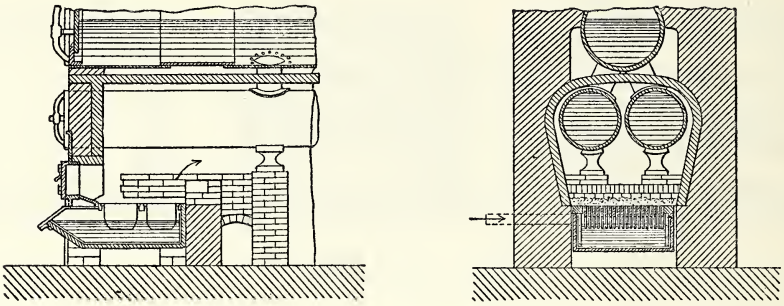


Fig. 83. — Grille, système Michel Perret.

empêcher cette perte, on cherche à serrer les barreaux, le moindre gondolement les écarte et le filage du menu recommence. La grille Perret (fig. 83) est composée de barreaux en fonte très minces, très hauts et très serrés; la haute nervure qui en forme le corps baigne par le bas dans un baquet plein d'eau, qui empêche les barreaux de s'échauffer, s'oppose à leur gondolement et à l'adhérence des scories. Ces foyers s'accommodent bien du tirage artificiel.

M. Godillot (Alexis), de Paris, a imaginé un système de grille pour opérer la combustion de certaines matières très volumineuses et dégageant peu de chaleur, comme la sciure de bois, la tannée, la balle de riz, les cossettes des sucreries, etc. Pour entretenir le feu sous une chaudière, il faut brûler des volumes énormes de ces combustibles, et le chargement à la pelle sur une grille ordinaire devient presque impraticable.

L'appareil de M. Godillot se compose d'une grille à gradins *AA* (fig. 83), présentant, dans son ensemble, la forme d'un cône à axe vertical; le combustible, placé dans une trémie *B*, est poussé par une hélice *C*, tournant lentement sous l'action d'un moteur;

la matière, amenée sur le sommet du cône, descend progressivement sur toute la surface et se brûle au fur et à mesure.

La grille Godillot peut être également employée pour le poussier de coke et les fines de houille; à l'Exposition, elle était appliquée et en fonction sous les trois groupes de chaudières installées par la maison Davey et Paxman, la maison Roser et la maison Daydé et Pillé.

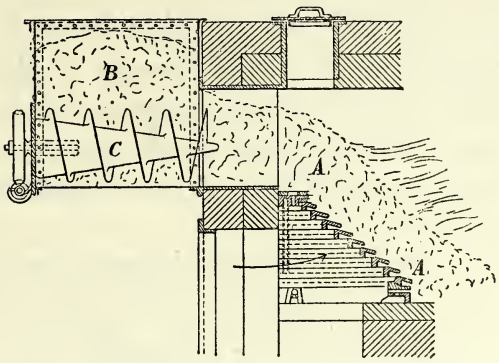


Fig. 84. — Foyer, système A. Godillot.

La combustion, surtout celle de la houille, est presque toujours accompagnée du dégagement de fumées plus ou moins épaisses, qui sont souvent fort gênantes pour le voisinage. La suppression de ces fumées serait, dans bien des cas, un véritable bienfait. La question de la *fumivorité* (c'est le nom qu'on lui donne) préoccupe depuis longtemps le public, et elle a acquis, dans ces dernières années, un véritable intérêt d'acuité. Il est utile de s'y arrêter.

Les produits de la combustion se composent de gaz et de particules solides. Les gaz permanents, azote, acide carbonique, vapeur d'eau, oxyde de carbone, sont irrespirables, quelques-uns sont vénéneux; les particules solides sont principalement constituées par la suie, laquelle donne à la fumée sa couleur noire caractéristique. La suie, qui est du carbone additionné de quelques hydrocarbures, n'a pas par elle-même d'action toxique bien notable, mais elle tache et salit tout ce qu'elle touche : c'est là son plus grand inconvénient, et il ne laisse pas que d'être fort sérieux. Les gaz contenus dans la fumée sont assez promptement dilués dans l'atmosphère. Il n'en est pas de même de la suie : les grains qui la composent se décantent par ordre de dimension; les gros grains tombent dans le voisinage, les fines poussières sont emportées plus loin et quelquefois à de grandes distances.

Dans les centres importants de population, et surtout dans les agglomérations industrielles, où un grand nombre de foyers à houille vomissent à la fois leurs produits, l'atmosphère ne tarde pas à être sérieusement viciée, surtout par les temps calmes. Toutefois on s'est peu préoccupé jusqu'ici de l'action délétère des gaz de la fumée; ce n'est que dans certains cas spéciaux que cette action a été signalée par les hygiénistes; et encore ce ne sont pas les fumées de charbon qui ont surtout appelé l'attention, mais bien les gaz dangereux émis par certaines industries chimiques.

Quant à la suie fournie par ces milliers de foyers, une partie reste en suspension dans l'air, obscurcissant le soleil, empâtant l'atmosphère; il semble même démontré que ces particules très fines activent la formation des brouillards; une autre partie se dépose sous forme d'une poussière noire, gluante, qui s'attache aux tentures, aux

meubles, aux vêtements, au linge, s'étale sous le moindre frottement, souille et détériore tous les objets.

La suie est un véritable fléau; les plaintes qu'elle provoque n'ont cessé de se faire entendre depuis le jour où la houille est devenue d'un usage courant. Dans les pays industriels, des dispositions administratives ou législatives ont été prises en vue de garantir le public contre les inconvénients des fumées; elles ont été renouvelées à plusieurs reprises. Malheureusement, il faut bien le constater, toutes ces mesures n'ont eu que d'assez maigres résultats; et les cheminées continuent, comme par le passé, à se couronner de leur noir panache, en dépit de tous les règlements, et au grand dommage des voisins; on l'a bien vu même au Champ de Mars.

En France, depuis l'Exposition de 1878, la question a fait un pas important, mais c'est un pas rétrograde. Les anciens règlements rendaient obligatoire la suppression de la fumée, du moins en ce qui concerne les foyers des chaudières à vapeur; dans le règlement actuel sur les appareils à vapeur, promulgué en 1880, cette obligation a disparu; est-ce oubli ou négligence? Pas le moins du monde; cette omission a été absolument préméditée et voulue, et on la justifie par deux motifs : le premier, c'est que la fumée qui sature l'atmosphère des grandes villes n'est pas produite uniquement par les foyers des chaudières; tous les foyers brûlant de la houille y ont leur part, quels que soient les services qu'ils ont à faire, industrie, cuisine, chauffage domestique, etc.; il n'y a donc pas lieu de décréter spécialement pour les appareils à vapeur, puisqu'ils ne sont pas les seuls coupables.

Le second motif que l'on invoque est le suivant : les citoyens lésés peuvent invoquer le droit commun et actionner en justice ceux qui leur causent dommage en produisant de la fumée. L'argument peut paraître discutable.

Que l'on ait eu tort ou raison de supprimer en France les prescriptions dont il s'agit, il n'en est pas moins certain que, grâce à la fumée, le séjour des villes devient de plus en plus désagréable. A Paris, notamment, depuis l'établissement des stations centrales d'électricité, puissantes usines qui développent des milliers de chevaux et déversent des torrents de fumées épaisses dans l'atmosphère des quartiers les plus élégants, la situation pour certains immeubles est, par moments, presque intolérable. Du reste, il ne faut guère se bercer de l'espoir que les choses iront en s'améliorant, car il paraît douteux que le nombre des stations d'électricité cesse de s'accroître.

Ce n'est pas que des efforts sérieux et soutenus n'aient été tentés pour supprimer ces graves inconvénients. On a cherché par bien des moyens à faire disparaître la fumée noire qui se dégage des foyers. Les principes théoriques ont été posés, et bien posés, il y a près d'un demi-siècle, par l'illustre Combes; ils se résument en deux lignes : pour qu'un foyer n'émette pas de fumée, il suffit que la combustion y soit complète; et la combustion sera complète si l'air est admis en quantité suffisante, et brassé à haute température avec les gaz combustibles dégagés de la houille. Mais de la théorie à l'application, il y a loin. Des centaines de systèmes dits *fumivores* ont été inventés,

expérimentés, prônés; entre les mains de leurs inventeurs, ils ont donné des résultats remarquables; certains d'entre eux ont même reçu des applications étendues; et puis, peu à peu, le silence et l'oubli se sont faits; bien rares sont les dispositifs de foyers fumivores qui ont résisté à l'épreuve d'une pratique un peu prolongée.

Il faut convenir, d'ailleurs, que le problème est plus compliqué qu'il n'en a l'air au premier abord; si l'allure d'une chaudière était absolument régulière et uniforme, il ne serait pas bien difficile d'obtenir une combustion complète, en déterminant convenablement le régime du chargement et l'intensité du tirage, de telle sorte qu'il y eût constamment une sorte d'équilibre entre le débit de l'air et la consommation du combustible. Dans de pareilles conditions, la plupart des appareils fumivores rempliraient convenablement leur objet : il suffirait, lors de la mise en train, de quelques tâtonnements pour régler une fois pour toutes, et définitivement, l'allure de la combustion.

Mais en pratique il est loin d'en être ainsi : le générateur devant fournir à chaque instant la vapeur en quantité égale à la consommation, laquelle varie sans cesse, tantôt plus active, tantôt plus lente, un régime permanent ne saurait s'établir; c'est donc, à chaque changement d'allure, un nouveau réglage à faire, d'autant plus difficile et incertain que l'appareil est plus délicat et compliqué; ces réglages multipliés exigent de la part du conducteur du foyer une très grande adresse; du moment que l'on doit compter avant tout sur l'habileté professionnelle du chauffeur, la manœuvre beaucoup plus simple d'un registre ordinaire reprend dans la plupart des cas l'avantage.

Il est encore un point, qui paraît bien secondaire, et qui cependant ne manque pas d'importance : le chauffeur, enfermé dans la chambre des chaudières, ne voit pas, en général, la tête de la cheminée; il ne peut se rendre compte si elle fume; à l'égard de la fumée, il est réduit, pour ainsi dire, à agir en aveugle; le réglage de son feu lui devient dès lors fort difficile.

De ces tentatives en nombre infini et tombées, pour la plupart, dans l'oubli, il est resté néanmoins quelques idées, qui ont surnagé aux espérances que l'on avait tout d'abord conçues.

En premier lieu, on peut considérer comme démontré que la production de la fumée, même d'une fumée assez épaisse, n'est nullement incompatible avec une bonne utilisation du combustible; dans la fumée la plus noire, le poids de la suie en suspension ne représente qu'une fraction négligeable de la quantité de charbon brûlée; l'économie du combustible n'a rien à voir avec la fumivorité.

En second lieu, les mécanismes compliqués, les grilles mobiles, les systèmes à articulations délicates semblent définitivement condamnés : un foyer, exposé à des chaleurs intenses et à des causes de détérioration actives, doit être composé d'organes simples; robustes, presque grossiers.

Les grilles très inclinées, sur lesquelles le combustible descend par la simple action de la pesanteur, facilitent beaucoup le chargement, et tendent à assurer la régularité

IMPRIMERIE NATIONALE.

de l'allure. Ce dispositif, inauguré avec succès par Ten-Brinck, a été adopté dans plusieurs des foyers de l'Exposition. La grille inclinée est souvent accompagnée de lumières, envoyant des filets d'air très minces au-dessus de la couche de houille; mais alors il est utile de compléter le système par des déflecteurs ou écrans, qui obligent le mélange d'air et d'hydrocarbures à tourbillonner au contact du combustible incandescent.

Le brassage énergique de la masse gazeuse contenue dans la chambre de combustion est aussi obtenu à l'aide de minces jets de vapeur, lancés avec grande vitesse au-dessus de la couche de combustible; quelquefois le jet de vapeur entraîne avec lui, par transmission latérale, une veine d'air frais. Quand l'appareil est bien disposé et convenablement manœuvré, il fait disparaître à peu près complètement la fumée. Il va de soi que de pareils dispositifs, qui dépensent beaucoup de vapeur, ne sont nullement économiques; mais employés avec intelligence pendant les quelques instants qui suivent le chargement du combustible frais, ils peuvent atténuer les inconvénients de la production de la fumée.

Ce dispositif est appliqué par un certain nombre de constructeurs, notamment par la maison Belleville.

M. Lencauchez (Alexandre), de Paris, est l'auteur de nombreuses et intéressantes recherches relatives à la production de la vapeur et notamment à la combustion; son exposition comportait, entre autres pièces remarquables, des dessins de gazogènes, ainsi que des perfectionnements apportés au foyer Ten-Brinck, lequel, comme on sait, est appliqué en France avec succès sur un grand nombre de locomotives.

Nous avons eu à plusieurs reprises occasion de parler des études si persévérantes et des inventions de M. S.-L. Dulac, de Paris. La chaudière qu'il avait installée dans la cour de la force motrice était munie d'un foyer spécial; la grille, très inclinée comme dans le système Ten-Brinck, est pourvue de barreaux rafraîchis par un courant d'eau; le chargement est opéré par une sorte de poche basculante, que le chauffeur peut remplir tout à son aise, et qui, en se renversant, rejette la charge sur le haut de la grille, en l'étalant avec beaucoup de régularité; grâce à un agencement convenable, ces opérations se font sans que l'air pénètre dans le foyer par l'ouverture de la porte.

Le système de foyer proposé par MM. Herrmann (E.) et Cohen, de Paris, comporte un ensemble de dispositions bien entendues et d'un service commode. La grille très inclinée *AA* (fig. 85) ne reçoit le charbon qu'une fois qu'il a été distillé au préalable dans le compartiment supérieur *B*, lequel est contenu entre un seuil fixe *D* et une grille spéciale *EE*; cette grille peut être déplacée, de manière à régler l'écoulement du combustible; la houille est chargée par la trémie *F*; les produits de la distillation sont

refoulés sur la grille *AA* par le courant d'air introduit, sous l'action du tirage, par la trémie *F* et par la grille *EE*. La répartition de l'air est réglée par des papillons montés sur la porte *GG* de la grille supérieure et sur la porte *HH* du cendrier; un jette-feu *K* sert au décrassage; la grille principale *AA*, supportée par un levier *L*, peut s'abattre pour l'allumage et le nettoyage. Les organes de manœuvre, leviers et volants, sont placés au dehors, à la main du chauffeur.

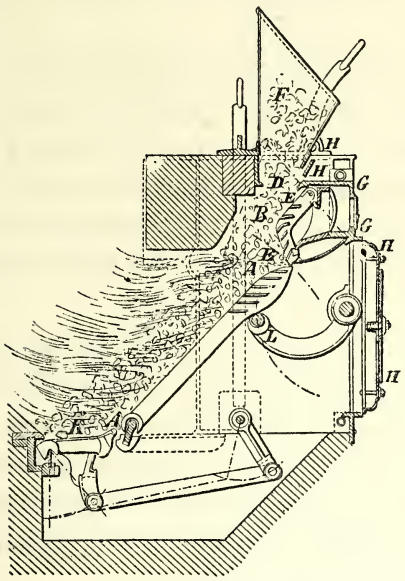


Fig. 85. — Foyer, système Hermann et Cohen.

M. Criner (Georges), de Paris, présente un foyer ayant pour objet d'obtenir la combustion complète par le brassage des gaz chauds au contact de matières à températures élevées; à cet effet, il dispose, sur le parcours des flammes, des chicanes en maçonnerie réfractaire, qui arrivent rapidement au rouge, et qui brisent et font tourbillonner le courant gazeux.

On voit qu'en matière de fumivorité, le contingent fourni par l'Exposition de 1889 est en définitive assez maigre. Il semble qu'en présence des difficultés de la question, une sorte de découragement se soit emparé des inventeurs. Et cependant la solution semble chaque jour plus urgente. L'atmosphère des villes est, à certaines époques, d'une malpropreté révoltante; les réclamations deviennent de plus en plus vives, et il faut convenir qu'elles sont bien souvent fondées. On a multiplié les enquêtes, les commissions, mais en vain : jusqu'ici tous les efforts sont restés à peu près impuissants; et on est bien obligé d'avouer que le spectacle offert par les cheminées de l'Exposition n'était pas précisément encourageant. Pour le moment, on ne voit guère de moyen de supprimer la fumée, si ce n'est d'interdire l'usage de la houille, c'est-à-dire d'anéantir la plupart des industries qui font usage de ce précieux combustible, procédé brutal et barbare, qui ne paraît, heureusement, avoir aucune chance d'être de longtemps appliqué.

Quant aux fourneaux des chaudières en feu, à l'Exposition, leur construction était en général bien entendue et convenablement agencée. Parmi les constructeurs qui se sont fait une spécialité de la fumisterie, il convient de citer les maisons Geneste, Herscher et Cie, Cordier aîné, Nicon et Demarigny, Toisoul et Fradet, de Paris, etc.

La plupart des entrepreneurs de fumisterie établissent également les cheminées d'usine. Une grande cheminée est une œuvre d'art, à l'égal d'un grand pont ou d'un

viaduc; quelques cheminées atteignent des hauteurs de 100 mètres et plus; pour élever ces difficiles constructions, dans des conditions convenables de stabilité et d'économie, il faut une véritable habileté et des précautions toutes particulières. Les cheminées de l'Exposition étaient loin d'avoir de pareilles dimensions; elles se distinguaient par leurs bonnes proportions, et quelques-unes par une véritable élégance de formes.

Nous donnons ci-après (fig. 86) le dessin de la cheminée construite par les Ateliers de construction de Creil (Daydé et Pillé) pour le service de la batterie de quatre générateurs, système Lagosse et Bouché, installée par la même maison dans la cour de la force motrice. Cette cheminée a 35 mètres de hauteur; elle est ronde et son diamètre intérieur est de 1 m. 70. Elle est construite en tôle et n'a pas de haubans, c'est-à-dire que sa stabilité est due au massif de fondation en maçonnerie, sur lequel elle est assemblée par de vigoureux ancrages.

Le fût de la cheminée est en tôle de 0 m. 006; il est constitué par 35 viroles de 1 mètre, réunies par des couvre-joints intérieurs en forme d'anneaux. Sur 14 mètres de hauteur règnent des contreforts, au nombre de six, en treillis de tôles et cornières, donnant à la base un diamètre d'appui de 5 m. 26 et traversés par les boulons de fondation. Le chapiteau, rapporté au sommet du fût, est en tôles embouties. La cheminée a été assemblée sur chantier, puis mise au levage à l'aide de chèvres; cette opération a exigé quelques précautions, à cause de la faible épaisseur du métal.

Ce mode de construction, dont il existe quelques exemplaires, procure des cheminées légères, économiques, et que l'on peut, au besoin, déplacer et transporter à peu de frais. La cheminée de MM. Daydé et Pillé était de bonnes proportions et d'aspect élégant.

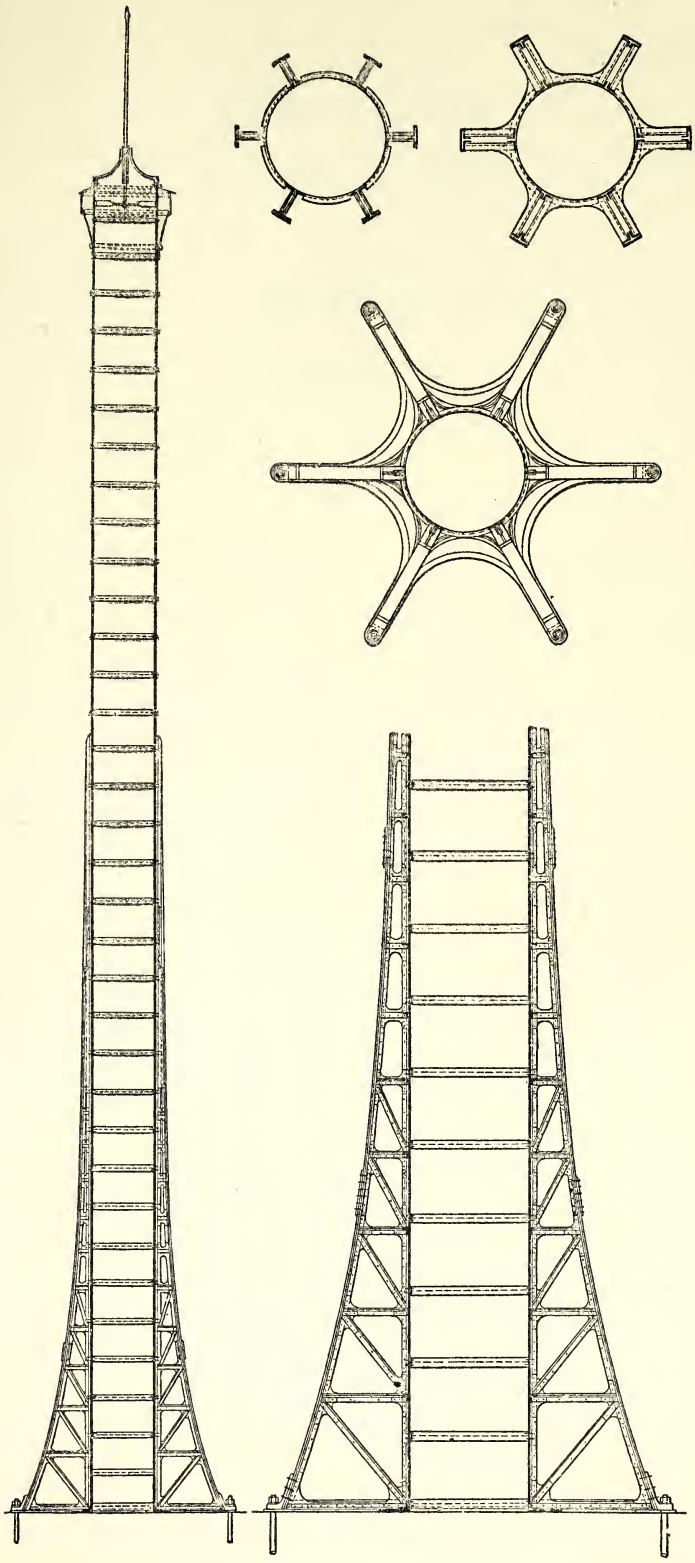


Fig. 86. — Cheminée construite par les Ateliers de construction de Creil (Daydé et Pillé).

CHAPITRE IV.

MACHINES À VAPEUR.

SECTION I.

GÉNÉRALITÉS.

SOMMAIRE.

Principaux types de machines. — Installations hors des villes et dans les villes. — Pression; vitesse; détente. — Transmission. — Machine à balancier; machine horizontale; machine pilon.

Détails de construction. — Cylindre, piston, bâti. — Matériaux de construction : acier, alliages, fonte malléable. — Ajustage. — Graissage. — Condensation. — Aspect général des machines.

Mode de fonctionnement de la vapeur. — Influence des parois. — Expériences de Hirn. — Calcul du travail. — Calcul de la dépense de vapeur. — Vapeur surchauffée. — Enveloppe de vapeur. — Compression. — Détentes par déclenchement et expansion multiple.

De la distribution de vapeur. — Détente et avances.

Lumières.

Obturateurs. — Obturateurs levants : soupape équilibrée, soupape à double siège ou soupape de Cornouailles. — Obturateurs glissants : tiroir en coquille, tiroirs à jalousie ou à grille, tiroirs compensés, tiroirs pistons, distributeurs coniques, distributeurs à rotation continue. — Tiroirs superposés.

Commande des distributeurs. — Commandes desmodromiques : par un excentrique circulaire, par la manivelle ou la bielle, système Walschaërts, par leviers, à rapports variables de vitesse, par rotation continue. — Commandes par déclenchement. — Commandes à repos. — Commandes diverses. — Résumé.

Des moyens de faire varier la puissance motrice. — Par étranglement. — Par la détente : détente variable à la main, par le régulateur, par distributeurs superposés. — Obturation de l'arrivée de vapeur. — Système Farcot. — Système Meyer. — Machines à multiple expansion.

Changement de marche. — Interversion des communications. — Décalage de l'excentrique : décalage à toc, à coulisse. — Coulisse de Stephenson. — Commande par la bielle ou la manivelle. — Machines à multiple expansion.

Distributions spéciales. — Mise en train des locomotives compound. — Machines à simple effet. — Pompes sans arbre tournant. — Servo-moteur. — Machines rotatives. — Turbo-moteur. — Pulsomètre. — Injecteur.

Divisions du chapitre.

La machine à vapeur compte aujourd'hui près de deux siècles d'existence. Après la période d'essais et de tâtonnements, qui a rempli le XVIIIe siècle, elle est sortie des mains de James Watt à l'état d'outil industriel et complet; depuis cette époque, les principes sur lesquels repose le jeu de la machine à vapeur n'ont pas changé, et les organes essentiels sont restés les mêmes. Comme du temps de Watt, une machine à vapeur se compose des éléments suivants :

Un piston, qui se meut dans un cylindre et reçoit alternativement sur ses deux faces la pression du fluide moteur;

Une distribution, qui met, au moment voulu, chacune des extrémités du cylindre en communication avec la chaudière et avec l'échappement; cette distribution est automatique et commandée par le mouvement même de la machine;

Un arbre tournant, qui reçoit la puissance engendrée sur le piston par l'intermédiaire d'une transmission, composée de tiges, de bielles et autres pièces articulées;

Enfin divers accessoires, condenseur, pompes, etc.

Tous ces organes se retrouvent dans les machines modernes, remplissant les mêmes fonctions et affectés aux mêmes services.

Toutefois, si les principes généraux qui président à la construction des machines à vapeur n'ont pas éprouvé de modifications essentielles, il est loin d'en être de même en ce qui concerne l'application de ces principes. L'aspect seul de la galerie des Machines était, à ce point de vue, du plus haut intérêt; les machines exposées différaient profondément, soit comme dispositions, soit comme allure, du type consacré par le génie de Watt. Même à ne considérer que des époques rapprochées, comme celles des Expositions de 1889 et de 1878, les comparaisons sont fertiles en enseignements.

C'est qu'aussi de nouveaux problèmes se sont posés, exigeant l'appropriation nouvelle des principes immuables, qui restent à la base de la théorie. Les conditions imposées à l'industrie ont subi une transformation profonde, et ce mouvement s'accentue d'année en année avec une rapidité toujours croissante. A n'envisager que les machines de terre, qui font l'objet de la présente étude, on constate que, dans bien des cas, les données ont absolument changé; la machine à vapeur a dû s'assouplir, pour se prêter à des sujétions jusqu'alors inconnues. Autrefois les grandes manufactures, celles qui consomment un travail mécanique important, étaient presque toujours établies loin des villes, et s'étendaient à leur aise sur de vastes terrains de peu de valeur; l'établissement des moteurs n'avait à compter ni avec l'emplacement, ni avec le prix des constructions; c'étaient des machines largement constituées, aux vastes proportions, aux allures lentes et majestueuses; on demandait principalement que leur marche fût sûre et régulière; on redoutait avant tout les arrêts intempestifs, entraînant des chômages ruineux et d'autant plus prolongés, que, eu égard à l'état existant de la construction mécanique, les réparations étaient longues et pénibles. Le plus souvent, la question de l'économie dans la consommation du combustible ne venait qu'en seconde ligne; elle ne se posait d'une manière un peu pressante que dans certains cas exceptionnels, alors que le charbon était très cher et la puissance à développer très considérable et très continue.

Dans beaucoup d'usines modernes, les conditions sont toutes différentes. Les industries se sont peu à peu rapprochées des villes, où les attirent les mille facilités qui ne se rencontrent guère loin des centres habités; ou bien les populations se sont agglomérées et serrées autour des manufactures antérieurement existantes; souvent même les usines nouvelles ont dû s'installer au milieu des quartiers les plus vivants et les plus populeux : tel est, pour ne pas citer d'autres exemples, le cas des stations centrales d'électricité. Mais alors de nombreuses exigences, inconnues jusque-là, n'ont pas tardé à surgir.

En premier lieu vient s'imposer la garantie du voisinage contre tout danger et toute incommodité; nous avons eu déjà à étudier la question en ce qui concerne les explosions des chaudières et la fumée produite par leurs cheminées; mais il y a, dans le même ordre d'idées, à se préoccuper du bruit que font les machines, des vibrations qu'elles communiquent au sol et aux murs, de l'échappement de la vapeur, de l'écoulement des eaux chaudes, etc.

Le prix du terrain devenant fort élevé, et celui des constructions s'élevant en proportion, la question de l'emplacement occupé prend une importance capitale.

Les irrégularités ou interruptions du service sont plus graves et plus redoutées que jamais; mais les réparations se font aujourd'hui très rapidement, ainsi que le remplacement des pièces détériorées; grâce à la précision apportée au travail des métaux, les organes exposés à des accidents sont représentés en magasin par des doubles, permettant le remplacement immédiat, sans tâtonnement, sans ajustage. En outre, les moteurs, même de grande puissance, n'occupant que des emplacements restreints, il est facile d'installer des machines de rechange, prêtes à prendre le service de celles qui viennent à faillir.

Dans les installations urbaines, la vapeur coûte très cher. Les facteurs principaux du prix de la vapeur sont : en premier lieu, le prix du charbon, lequel est surchargé de droits d'octroi et de frais de transport, de camionnage et de magasinage, etc.; en second lieu, le prix de l'eau, très élevé dans les villes, soit que l'eau soit empruntée à la distribution publique, soit qu'il faille l'aller chercher dans la nappe souterraine, à l'aide de puits profonds et coûteux; enfin les dépenses représentant l'intérêt et l'amortissement des capitaux consacrés à l'installation des chaudières, à l'achat du terrain qu'elles occupent et à la construction des bâtiments de chauffe. La vapeur étant un produit d'un prix élevé, la consommation en doit être réglée avec une grande économie, avec une économie beaucoup plus stricte encore que la consommation du combustible, puisque, en définitive, le charbon brûlé ne constitue qu'une partie, et souvent la plus faible, de la dépense faite pour la fabrication de la vapeur. A ces divers points de vue, sujétions d'emplacement, nécessité d'une rigoureuse économie, les machines installées dans les centres habités se trouvent placées dans des conditions analogues à celles des appareils moteurs de la navigation maritime. Il n'y a donc pas à s'étonner si, dans un grand nombre d'installations de ce genre, les types marins ont été adoptés et fonctionnent avec succès.

Résumant ce qui précède, nous voyons que les moteurs fixes peuvent se diviser en deux grandes catégories :

La première catégorie se rapporte aux manufactures éloignées des centres habités, n'ayant pas à compter avec des sujétions étroites; en de pareilles circonstances, les anciens types de moteurs sont encore fort en usage et rendent les meilleurs services. Ce sont le type à balancier ou le type horizontal à connexion directe qui sont les plus employés, dispositifs comportant de larges proportions, marchant à des allures modérées,

actionnés par de la vapeur à pression moyenne, d'une conduite facile, d'un entretien peu coûteux, très durables et ne demandant que de rares réparations. D'ailleurs, par l'effet d'une réaction toute naturelle, la construction de ces machines a profité dans une bonne mesure des perfectionnements qui se sont imposés dans l'établissement des moteurs de la seconde catégorie.

Ceux-ci, installés dans le centre des villes, ont dû se plier aux exigences multiples et rigoureuses résultant de leur situation. Leurs caractères distinctifs sont : les allures vives, les hautes pressions et, par suite, un graissage plus parfait; un agencement compact et occupant peu de place, surtout en plan; des formes souvent nouvelles, parfois bizarres; un entretien plus délicat et plus coûteux. L'éclairage électrique exigeant une vitesse sensiblement constante, les appareils régulateurs ont fait l'objet d'améliorations importantes. Enfin, dans quelques cas, des solutions entièrement nouvelles et inattendues ont jailli des problèmes posés. C'est encore un exemple, après tant d'autres, de la merveilleuse souplesse avec laquelle la machine à vapeur modifie ses formes et son allure pour répondre aux conditions variées des services qu'elle a à faire. Ces moteurs nouveaux constituent des objets d'étude du plus haut intérêt et sont l'une des caractéristiques les plus remarquables de la dernière Exposition.

Nous examinerons actuellement les modifications qui ont été apportées depuis dix ans dans les trois données fondamentales des machines à vapeur, à savoir : la pression, la vitesse et la détente.

D'une manière générale, les pressions usitées tendent constamment à s'élever. Ainsi, dans les grandes usines établies en dehors des villes et sans sujétions spéciales, jusqu'en 1878, les pressions étaient généralement de 5 à 6 kilogrammes par centimètre carré (pression effective, c'est-à-dire comptée en sus de la pression atmosphérique); aujourd'hui on se tient encore à 6 kilogrammes dans beaucoup d'installations fixes; mais dans nombre de cas, on arrive à 7 et même 8 kilogrammes.

Dans les installations urbaines, ces chiffres sont le plus souvent dépassés; les machines marchent à 6 ou 8 kilogrammes à l'admission lorsqu'elles sont à condensation; sans condensation, on admet 8 à 10 kilogrammes, et les chaudières sont timbrées à 9, 10 et 15 kilogrammes. Il n'est pas inutile de rappeler, à ce propos, la progression continue qu'a subie la pression dans les locomotives des chemins de fer : de 4 à 5 kilogrammes vers 1840, cette pression s'est élevée à 8 et 9 kilogrammes en 1878; aujourd'hui elle oscille entre 9 et 11 kilogrammes; dans les locomotives compound qui figuraient à l'Exposition, le timbre variait entre 12 et 15 kilogrammes.

Ces fortes pressions ne peuvent être admissibles qu'à la condition que les joints soient bien étanches; aussi le perfectionnement des joints a-t-il suivi une marche parallèle à l'accroissement des pressions; ce sont principalement les joints fixes qui ont été l'objet d'améliorations importantes; quant aux joints à friction, tels que celui du piston

contre le cylindre, c'est surtout par un graissage mieux entendu qu'ils se distinguent; car les grandes vitesses aujourd'hui pratiquées atténuent beaucoup l'influence fâcheuse des fuites.

A pression et à surface égales, le travail engendré sur le piston est proportionnel à la vitesse de cet organe. Cette vitesse elle-même se compose de deux facteurs : la course du piston et la vitesse de rotation de la machine, autrement dit, le nombre de tours qu'elle fait par minute.

Dans les grandes machines fixes, auxquelles on demande avant tout la durabilité et l'économie d'entretien, la vitesse de rotation est toujours modérée : à part les cas spéciaux, elle ne descend pas au-dessous de 25 à 30 tours par minute, et ne dépasse guère 60 à 80 tours; ce sont à peu près les mêmes chiffres qu'en 1878. Mais on ne craint plus d'imprimer au piston des vitesses linéaires devant lesquelles on aurait reculé il y a quelques années : des vitesses de 2 m. 50 à 3 mètres sont courantes; dans certaines machines de l'Exposition, la vitesse moyenne du piston atteignait le chiffre élevé de 4 mètres par seconde (on sait que, dans les locomotives de trains express, la vitesse du piston dépasse dans certains cas 5 mètres). Il va de soi que, pour que des vitesses pareilles ne soient pas dangereuses, il est de toute nécessité que la construction, l'entretien et le graissage soient extrêmement soignés.

C'est principalement par l'augmentation de la course qu'on arrive à réaliser ces grandes vitesses; les machines allongées ont une marche plus calme, des frottements plus doux que les machines à large cylindre; par contre, elles sont notablement plus coûteuses, et comme prix d'achat, et comme emplacement et installation.

Les rotations rapides avec course modérée sont de plus en plus usitées dans les usines établies au milieu des habitations; malgré tout l'intérêt qu'il y aurait à imprimer au piston une grande vélocité, les vitesses linéaires n'atteignent pas, en général, les limites que nous avons indiquées pour les grandes machines d'usine, car, pour une même vitesse linéaire, les effets de l'inertie des masses en mouvement croissent en proportion de la vitesse de rotation; et d'ailleurs l'emplacement fait défaut pour développer les longues machines. Dans les usines électriques, les dynamos tournent fort vite; or il y a de très grands avantages à simplifier les transmissions, aussi bien au point de vue du rendement mécanique qu'à celui de l'emplacement occupé et des chances d'accidents. On est ainsi conduit à adopter, pour le moteur, de grandes vitesses de rotation. Avec les commandes par courroies, les vitesses de 160 à 240 tours par minute sont devenues tout à fait courantes, même pour des machines de 100 à 200 chevaux; ces vitesses sont notablement dépassées lorsque la dynamo est attelée directement sur le prolongement de l'arbre de la machine; en pareils cas, on arrive facilement à 300, 500 et même 800 tours par minute; rappelons aussi que certains moteurs à vapeur de l'Exposition, analogues, par leur fonctionnement, aux turbines desservies par des chutes d'eau, tournaient à raison de 8,000 à 10,000 tours par minute. Mais

en s'en tenant aux vitesses indiquées ci-dessus pour les moteurs à piston et qui, nous le répétons, n'ont plus rien d'exceptionnel, il est certaines précautions à prendre dans la construction et sans lesquelles l'appareil serait mis rapidement hors de service. Il s'agit, en premier lieu, de l'équilibration des masses en mouvement, question secondaire pour les moteurs tournant lentement, mais qui prend ici une importance capitale. C'est par des études très approfondies de la dynamique de ces systèmes et par une exécution extrêmement correcte qu'on arrive à résoudre ces difficiles problèmes. Les proportions des surfaces frottantes et les moyens d'assurer une lubrification énergique sont aussi des points qui doivent être étudiés attentivement. Il y a là toute une mécanique nouvelle, qui est une des caractéristiques les plus intéressantes de l'Exposition de 1889.

Le degré de détente est en corrélation immédiate avec les pressions à l'admission et à l'échappement; d'une part, la condensation permet des détentes beaucoup plus prolongées; d'autre part, plus est forte la pression à l'admission, plus il y a avantage à développer l'expansion.

Avec les pressions élevées qui sont aujourd'hui en usage, toutes les machines un peu puissantes comportent une détente prolongée; il en est ainsi même des machines sans condenseur, auxquelles les usines électriques sont assez souvent obligées d'avoir recours, lorsque l'eau est trop chère pour que l'on puisse faire de la condensation dans des conditions économiques.

Pour des pressions de 9 à 10 kilogrammes sans condensation, on admet, en marche normale, du 1/3 au 1/5 de la course du piston; la détente est plus prolongée lorsque la pression à l'admission est plus forte; les degrés d'expansion sont notablement plus élevés que ceux qui étaient pratiqués en 1878. Il en est de même en ce qui concerne les machines à condensation : 1/6 à 1/8 sont des valeurs ordinaires; on va jusqu'à 1/10 et 1/12 et au delà pour les fortes pressions à l'admission.

Avec les vitesses de piston aujourd'hui pratiquées, les lumières doivent être très grandes, comparativement au diamètre du cylindre; à cette circonstance vient se joindre l'emploi de détentes prolongées. Pour répondre à cette double sujétion, les anciennes distributions sont insuffisantes dans bien des cas. L'Exposition de 1889, plus encore que celle de 1878, était riche en systèmes de distribution variés, les uns tout à fait nouveaux, les autres empruntant des principes ou des dispositifs déjà connus. Nous aurons à faire l'étude de détail de quelques-unes des distributions exposées; il convient, sans sortir des généralités, d'en indiquer dès à présent les principaux caractères.

En dehors des distributions ordinaires qui continuent à être appliquées couramment, deux systèmes se partagent aujourd'hui les préférences des constructeurs : la distribution par déclenchement et la détente par échelons.

La distribution par déclenchement s'adapte aux grandes machines à vitesse de rota-

tion modérée, ne dépassant pas 60 ou 80 tours à la minute; elle se fait, en général, par quatre lumières; les obturateurs sont des tiroirs tournants, genre Corliss, ou des soupapes Sulzer à double siège; quelques maisons se servent de tiroirs plats à grille, malgré les résistances plus grandes que ce genre de distributeur oppose aux déplacements. La commande, empruntée d'ordinaire à un excentrique, est obtenue par des transmissions extrêmement variées; c'est un problème facile et attrayant, sur lequel l'imagination des ingénieurs s'est largement donné carrière. Dans quelques machines, la question a été résolue d'une manière ingénieuse et élégante par l'adaptation du principe du servo-moteur.

Avec les grandes vitesses de rotation, on est dans la nécessité d'en revenir à la commande desmodromique, qui seule assure des relations de position correctes entre le piston et l'obturateur, malgré les effets, souvent considérables, dus à l'inertie et aux frottements. Cette commande est prise, soit sur un excentrique, soit sur la bielle. Les distributeurs sont, le plus souvent, des tiroirs à coquille ou leurs variétés; ces tiroirs sont d'ordinaire équilibrés, surtout dans le cas où la détente variable est sous l'action du régulateur; quelquefois la distribution est à quatre lumières, avec obturateurs commandés par un système de leviers dérivant du dispositif Corliss.

Les commandes desmodromiques avec larges lumières ne donnent pas d'une manière simple des détentes très prolongées; c'est à la détente par échelons qu'on a le plus souvent recours en pareil cas. A l'Exposition, la plupart des machines à grande vitesse de rotation étaient à double ou à triple expansion, avec tiroirs simples ou équilibrés et commande desmodromique; le système, lorsqu'il est bien établi, fonctionne avec beaucoup de régularité et d'économie ; il est à peu près le seul qui permette, sans augmenter outre mesure la dépense de vapeur, d'atteindre les vitesses très grandes qu'exige l'actionnement direct des machines dynamo-électriques. C'est à la navigation maritime, où il a fait depuis longtemps ses preuves, que ce dispositif a été emprunté, et il est appliqué à l'éclairage électrique avec des formes et un dessin empruntés également aux machines marines: le rapprochement était frappant dans plusieurs des installations électriques de l'Exposition. C'est aussi des machines de navigation que dérive l'usage de la triple expansion, qui a pris des développements importants, à partir du moment où l'usage des hautes pressions est devenu courant.

Après les explications relatives aux trois données fondamentales de toute machine à vapeur, à savoir : la vitesse, la pression et la distribution, il convient de jeter un coup d'œil sur les organes qui servent à transmettre à l'arbre tournant le travail engendré sur le piston, sur le système mécanique connu sous le nom de *transmission*.

La transmission n'est pas, comme le piston et le tiroir, dissimulée à l'intérieur d'un cylindre et soustraite à la vue; constituée par des organes extérieurs, c'est elle qui donne au moteur son aspect plus ou moins harmonieux et élégant; tandis qu'il faut

des dessins et une étude pour se rendre compte du jeu des organes intérieurs et vitaux, le premier coup d'œil jeté sur les organes de la transmission produit une impression heureuse ou désagréable. C'est cet effet d'ensemble des moteurs en mouvement qui séduisait les visiteurs de l'Exposition et contribuait à imprimer à la galerie des Machines son cachet si particulier et si original.

Pour l'ingénieur, la transmission est constituée par un certain nombre d'organes, tiges, bielles, leviers, soumis à des efforts souvent considérables, et qui forment un ensemble dont l'agencement et les proportions répondent plus ou moins bien au service à faire. Cet agencement des organes de transmission peut être combiné de bien des façons, et les systèmes ont été autrefois fort nombreux et très divers. Une étude plus approfondie a conduit à des éliminations successives; au point de vue qui nous occupe, à part quelques exceptions présentées comme simples tentatives, les machines à vapeur fixes n'offrent plus aujourd'hui que trois types : le type à balancier, le type horizontal à connexion directe et le type pilon; toutes les autres formes, jadis si multiples, machines à fourreau, à bielle en retour, à balancier renversé ou coudé, à cylindre oscillant, etc., ont à peu près disparu ou sont réservées pour des usages spéciaux.

La machine à balancier supérieur, dessinée par Watt et arrêtée par lui dans ses proportions et ses détails, est demeurée, depuis plus d'un siècle, telle qu'elle était sortie des mains de l'illustre ingénieur. Rien n'a été changé au type primitif, auquel quelques-unes de nos bonnes maisons de construction sont restées absolument fidèles. La seule modification un peu notable qui ait été introduite, c'est l'addition, devenue aujourd'hui générale, d'un second cylindre, en vue du fonctionnement Woolf. Grâce à la beauté et à l'harmonie de ses formes, grâce à la majesté et à la correction de ses allures, cette machine est consacrée comme classique. D'autres qualités d'ailleurs justifient la préférence que lui accordent encore aujourd'hui des industriels sérieux et bien avisés; elle est fort économique, très durable, d'un entretien peu coûteux et facile; elle n'est pas sujette aux caprices, aux chômages et aux accidents; c'est un outil sûr, qui produit son travail régulièrement et à bon compte.

Malgré ces remarquables mérites, la machine de Watt ne trouve pas toujours grâce devant les brutales exigences de l'industrie moderne, si ardente, si âpre à la concurrence, si avare de son temps et de ses capitaux. La durée n'est presque plus une qualité, alors que tout se transforme rapidement, et les tendances et les procédés. L'économie d'entretien disparaît, en présence des frais d'installation élevés que nécessitent les amples dimensions de l'appareil, résultant de la lenteur de ses allures. La machine à vapeur moderne a besoin d'être plus active, moins encombrante. Aussi le type à balancier n'était-il représenté à l'Exposition que par un fort petit nombre d'exemplaires.

Le type le plus répandu dans l'industrie est aujourd'hui la machine horizontale à connexion directe, dans laquelle la transmission entre la tige du piston et la manivelle

se réduit à une pièce, la bielle. Composée du plus petit nombre d'organes, tous simples et légers, cette transmission s'accommode également des plus faibles et des plus grandes vitesses; tout le mécanisme, couché dans un même plan horizontal, est à bonne hauteur et bien à la main; c'est l'outil courant et industriel. A côté de ces qualités précieuses, la machine horizontale présente certains inconvénients : elle s'use plus vite, à cause de l'action dissymétrique de la pesanteur, et le réalésage du cylindre a besoin d'être refait plus souvent que dans les types verticaux, faible désavantage pour peu que la durée de la machine soit plus longue que l'étape qui sépare deux transformations de l'usine qu'elle met en mouvement.

Le type pilon, emprunté à la marine, et dont les applications à terre étaient jadis fort rares, prend chaque jour plus de développement; il est surtout usité dans les cas où la question de l'emplacement occupé entre en ligne; il permet d'installer de puissants moteurs dans des espaces fort restreints; la transmission, aussi simple que dans le type horizontal, se prête aux mêmes variations d'allure; quoique le mécanisme coûte un peu plus cher, la différence de prix n'est pas très importante; elle est d'ailleurs largement regagnée par les économies faites sur les achats de terrain et les bâtiments; l'entretien est encore facile, mais un peu moins commode que pour le type horizontal; l'assiette est bonne et solide, le piston travaille d'aplomb, ce qui en assure la durée et l'étanchéité.

Quelques mots encore sur les détails d'exécution de quelques-uns des organes des machines à vapeur.

Dans la plupart des machines exposées, le cylindre est entouré d'une enveloppe de vapeur. On a longtemps redouté de faire d'une seule pièce venue de fonte le cylindre et son enveloppe. Plusieurs bonnes maisons sont demeurées fidèles à l'ancienne pratique, consistant à couler séparément ces deux organes et à les assembler ensuite à l'aide de joints précis. Mais, de son côté, l'art de la fonderie a fait de notables progrès et est plus sûr de ses méthodes; et, dans beaucoup d'ateliers, on a pris, non sans succès, le parti de fondre d'une seule coulée le cylindre et son enveloppe; ces pièces, de formes compliquées, sont assurément difficiles à exécuter, aussi bien comme moulage que comme ajustage; mais elles présentent l'avantage de ne pas comporter de joints, dont l'influence est d'autant plus pernicieuse qu'ils sont cachés et échappent au contrôle.

Les pistons ont ordinairement des dispositions simples; la garniture suédoise, avec segments en fonte, est la plus employée; toutefois, dans les très grands pistons, tels que ceux des machines marines, les dispositions sont souvent plus compliquées. Malgré l'élévation des pressions, l'étanchéité des pistons a peut-être moins besoin d'être absolue, lorsque l'on a affaire, comme c'est souvent le cas aujourd'hui, à des machines à grande vitesse et à expansion multiple. D'ailleurs un nouvel et important élément est intervenu pour assurer à la fois la douceur des frottements et la bonne tenue des joints:

c'est le graissage, bien plus parfait aujourd'hui qu'il y a dix ans. Cette question du graissage présente une haute importance, elle réagit sur tous les dispositifs des machines; nous aurons à l'étudier en détail.

Les dispositions des bâtis ont été l'objet d'études sérieuses. Dans les machines horizontales, l'ancien bâti, à dessin symétrique par rapport à l'axe de la machine et fortement ancré à une longue et lourde fondation, est souvent abandonné : il comportait des masses de métal parasites, et se disloquait par l'effet des tassements et des vibrations; il est presque partout remplacé par le bâti américain, beaucoup plus rationnel comme répartition de la matière, et dans lequel la résistance inerte est concentrée au point où se produisent les efforts extérieurs, c'est-à-dire sous le palier. Quelques formes différentes de bâti horizontal sont proposées; elles procèdent toutes des mêmes principes : supprimer le métal dans les parties où il ne travaille pas, et concentrer la matière aux points où se concentrent les efforts.

Dans les machines pilons, le bâti est souvent constitué, en tout ou en partie, par des colonnettes légères, qui dégagent le mouvement et en facilitent la visite et le graissage.

Les organes de la transmission sont étudiés avec un soin particulier; dans les calculs de résistance, on s'attache, lorsqu'il s'agit de machine à grande vitesse, à tenir compte des effets de l'inertie, qui ont, dans bien des cas, une influence prépondérante; ces calculs de la résistance et de l'inertie, souvent si compliqués et exigeant, pour être menés à bonne fin, les ressources de l'analyse la plus délicate, sont exécutés couramment dans les bureaux d'étude annexés aux ateliers de construction, et les agents qui en sont chargés acquièrent parfois une grande habileté dans le maniement des formules; la statique graphique, science nouvelle dans ses procédés, sinon dans ses principes, donne de grandes facilités pour l'exécution des calculs de cette nature.

La construction des machines dispose aujourd'hui de matériaux nombreux et dont les qualités deviennent d'année en année plus parfaites et plus variées.

L'acier, qui inspirait encore, il y a dix ans, de légitimes défiances, et qu'on n'employait pas sans appréhension pour les pièces exposées à des chocs, entre aujourd'hui d'une façon presque générale dans la constitution des organes du mouvement. Pour les pièces forgées, on a recours surtout à l'acier doux, sauf à tremper au paquet les surfaces exposées à des frottements. Mais l'acier moulé, qui était presque une curiosité en 1878, est, au contraire, devenu d'un usage assez ordinaire. On obtient en moulage des pièces d'acier sans soufflures, dans lesquelles le métal contient peu de carbone et de silicium, reste doux, malléable, peu fragile, attaquable au tranchant des outils et prenant à peine la trempe. La substitution de la fonte d'acier à la fonte de fer a été réalisée dans un certain nombre de pièces moulées et tend à devenir plus générale.

Les alliages ont fait l'objet de recherches nombreuses. Il y a quelques années à peine, on ne faisait guère usage, dans la construction des machines, que de bronze ordinaire, composé de cuivre et d'étain. Aujourd'hui, pour les pièces frottantes, suivant que la pression des surfaces en contact est plus ou moins élevée, suivant que leur vitesse relative est plus ou moins grande, on se sert d'alliages fort variés; la gamme de ces alliages est loin encore d'être complète; toutes les nuances ne sont pas représentées; mais les recherches et les études se poursuivent de tous côtés, contrôlées par les outils de mesure, si précis et si pratiques, qui se trouvent dans tous les grands ateliers.

Parmi les matériaux destinés à résister au frottement, il convient de faire une mention spéciale du *bronze phosphoreux;* on le fabrique en ajoutant dans le creuset, au bronze ordinaire, une proportion variable de phosphure de cuivre. Il possède des propriétés remarquables, de la douceur, une grande résistance au frottement; il prend bien le poli; en outre, ces propriétés peuvent être graduées presque à volonté dans des limites fort larges, ce qui en étend singulièrement les usages.

D'autres alliages sont encore usités, soit en vue d'adoucir les frottements, soit pour prévenir le chauffage ou le grippement des pièces frottantes, soit pour remplacer les étoupes des garnitures étanches. Ces compositions, connues sous les noms de *métal blanc, d'antifriction,* etc., sont très variables comme constitution chimique; elles rendent dans beaucoup de cas de précieux services; toutefois leur fabrication, non plus que leur mode d'emploi, n'est pas encore sortie de l'empirisme.

La *fonte malléable* a pris une place assez importante dans la construction mécanique. On connaît le mode de fabrication de ce produit : l'objet moulé en fonte de fer est chauffé dans une masse d'oxyde de fer, qui enlève à la fonte une partie de son carbone; c'est l'opération inverse de la cémentation. Le métal ainsi obtenu possède la résistance et la malléabilité qui font défaut à la fonte ordinaire. Le procédé est resté assez longtemps mal défini et douteux dans ses résultats; mais la fabrication est devenue courante et régulière, et l'on hésite moins à se servir du nouveau métal pour les organes qui n'ont pas de trop grands efforts à supporter.

Les pièces, au sortir de la forge ou de la fonderie, ont le plus souvent à être ajustées, c'est-à-dire taillées à froid à l'aide d'outils tranchants, pour être amenées aux dimensions exactes fixées par les dessins. Dans ces dernières années, l'ajustage a fait d'importants progrès, surtout comme précision. De la fabrication des armes de guerre, dont tous les organes ont besoin d'être exécutés avec une rigueur mathématique, la précision dans l'ajustage s'est propagée dans toute la construction mécanique. Avec de bons outils et des contremaîtres soigneux, l'ajustage de précision ne coûte pas très cher et n'est pas difficile à obtenir, une fois entré dans les habitudes d'un atelier. Il présente les avantages les plus précieux : d'une part, il rend le montage très facile et supprime les retouches à la lime, si désastreuses au point de vue économique; d'autre part, il permet de fabriquer, sur un même modèle, des pièces inter-

IMPRIMERIE NATIONALE.

changeables, propriété de premier ordre, qui simplifie singulièrement et rend extrêmement rapides les réparations des machines et le remplacement de leurs organes détériorés. Pour les grosses pièces, la précision se mesure couramment au 1/10 de millimètre; on va au 1/50 de millimètre pour les pièces délicates. Les procédés généraux usités dans les ateliers d'ajustage n'ont pas beaucoup changé, si ce n'est que les machines-outils sont plus parfaites comme construction et commodité d'emploi. Toutefois il importe de signaler deux genres d'outils qui se sont fort répandus : la fraise et la meule, qui permettent de tailler les métaux les plus durs et d'atteindre le plus haut degré de précision. On fait aussi usage, dans les ateliers bien organisés, de machines-outils légères, faciles à déplacer, et qu'on monte sur les organes à travailler, lorsque ceux-ci sont lourds et volumineux; ces outils sont mus par des cordes, des câbles flexibles ou des transmissions électriques.

Nous avons parlé tout à l'heure du graissage des pistons et des organes qui se meuvent dans la vapeur. Nous dirons un mot de la lubrification des pièces de la transmission; le problème est assez délicat, surtout lorsqu'il s'agit de machines à grande vitesse de rotation.

Pour le graissage des articulations extérieures, comme pour celui des pistons, on fait de plus en plus usage de corps gras minéraux, qui ne rancissent pas et ne forment pas de cambouis. Dans les machines à allures rapides, on a souvent recours à un procédé qui a le double avantage d'être économique et de donner un graissage excellent : le lubrifiant est distribué en grand excès; il ne fait que traverser les articulations; une fois qu'il a rempli son office, il est recueilli dans des vases spéciaux et employé de nouveau après avoir été, au besoin, purifié par la filtration. Cette méthode ne serait évidemment pas applicable avec des huiles organiques, qui seraient promptement détériorées par l'oxydation.

Le lubrifiant est souvent liquide : on le distribue à l'aide de lécheurs, de tuyaux coudés ou d'autres artifices, aux articulations animées de mouvements rapides. Dans quelques machines soignées, cette distribution est systématisée et opérée à l'aide d'une véritable canalisation, formée de petits tuyaux en cuivre, qui prennent l'huile dans un réservoir unique et la répartissent dans toute la machine; un clavier de robinets mis à la main du mécanicien sert à régler cette répartition.

Pour éviter les projections d'huile résultant du mouvement des pièces, on fait fréquemment usage de graisses demi-fluides; un piston actionné par une vis expulse peu à peu ce lubrifiant du réservoir qui le contient.

L'étude des corps gras employés comme lubrifiants ainsi que l'étude des frottements ont fait l'objet de travaux nombreux et intéressants. Bien des faits nouveaux ont été constatés; les lois admises précédemment, les coefficients regardés longtemps comme bien établis ont été plus ou moins ébranlés; sur plus d'un point, le doute ou la négation ont remplacé la certitude; sur les ruines des anciennes théories, des idées neuves

se sont élevées. Mais l'édifice est loin d'être complet; il n'est qu'à peine ébauché, et son achèvement exigera sans doute de longues et difficiles recherches.

Pour terminer cette revue générale des organes des machines à vapeur, il convient de dire un mot des appareils de condensation.

La plupart des machines fixes marchent à condensation; ce n'est guère que dans les cas où l'eau est très chère ou fait défaut que l'on marche à échappement libre, et alors on travaille toujours à des pressions élevées.

La condensation par surface, si usitée dans les appareils marins, n'est pratiquée à terre que dans des cas exceptionnels : c'est toujours à la condensation par injection que l'on a recours.

Avec les machines à rotation rapide, la mise en mouvement des pompes à air ne laisse pas que d'offrir des difficultés; les pompes sont exposées à mal fonctionner. On se tire d'affaire par divers moyens. Dans quelques machines, on remplace le clapet unique par un grand nombre de clapets très petits, très légers, à peine chargés, qui suivent sans résistance tous les mouvements du fluide dans lequel ils sont plongés. Dans les installations un peu importantes, comportant plusieurs machines motrices, la condensation est faite dans un appareil unique qui dessert toutes les machines au moyen d'une tuyauterie; la pompe à air de ce condenseur séparé est mue par un petit cheval indépendant; ce dispositif, très simple, très pratique, présente en application de sérieux avantages.

Dans les villes, l'eau est généralement chère et difficile à se procurer; la condensation ordinaire deviendrait souvent impraticable. Des inventeurs ingénieux ont tourné la difficulté en refroidissant les eaux chaudes, pour les faire servir de nouveau. Ces eaux sont déversées sur un château d'eau et s'écoulent par cascades ou sur des fascinages, tandis qu'un courant d'air est lancé à leur rencontre; l'évaporation et le contact de l'air ramènent ces eaux à une température suffisamment basse. La consommation d'eau par ce procédé est réduite à fort peu de chose; elle est même plus faible que si la machine était sans condensation.

Les machines à vapeur qui sortent des bonnes maisons de construction se reconnaissent tout de suite à leur aspect général. Comme toute œuvre humaine, une machine a son côté artistique; c'est, en effet, un art véritable que de faire d'une machine un tout harmonieux, qui plaît au regard en même temps qu'il satisfait l'esprit, art délicat et sérieux, dont les ingénieurs consommés possèdent le secret, et qu'ils savent imprimer comme un sceau sur les produits qui sortent de leurs mains. Cet art, depuis quelques années, s'est singulièrement modifié dans ses tendances. Sous prétexte d'élégance, les constructeurs ont eu longtemps l'habitude de surcharger leurs machines de moulures, d'ornements parasites, empruntés au style grec ou au style gothique, au risque de rendre le service pénible et de créer partout des nids à cambouis. On est plus simple

aujourd'hui et, partant, plus sincère. Une machine est un outil fait pour travailler; tout ce qu'elle comporte de superflu est nuisible, toutes les pièces qui la composent doivent être réduites à la plus grande simplicité : pas de matière inutile, pas d'ornements parasites; les formes résultent du service à faire et des efforts à transmettre. Ces principes sévères et trop souvent méconnus semblent, à première vue, exclusifs de toute idée d'art et de beauté. Il n'en est rien cependant : si, comme on l'a dit, le beau est la splendeur du vrai, il paraît certain que l'étude attentive et approfondie doit conduire à des formes et des proportions qui soient belles et d'un heureux effet. Le palais de l'Exposition renfermait plus d'un spécimen de ces admirables constructions mécaniques, dans lesquelles aucun sacrifice n'a été fait à l'aspect extérieur et qui cependant produisent sur le visiteur cette impression de satisfaction complète, qui est l'apanage des œuvres accomplies. Des formes simples, à la fois robustes et hardies, donnant le sentiment d'une exacte proportion entre la résistance et l'effort, un groupement rationnel, mettant en relief le but et la fonction de chaque organe, des teintes sobres relevées par le brillant des pièces polies, tout cela, entre des mains habiles, peut former un ensemble agréable à l'œil le plus délicat. Quelques-unes des machines exposées étaient dignes d'être contemplées même au point de vue spécial de leur aspect, et lorsqu'elles étaient en mouvement, que les organes décrivaient leurs courbes élégantes et correctes, l'impression produite était profonde et les artistes de profession eux-mêmes ne dissimulaient pas leur satisfaction.

Nous avons jusqu'ici considéré la machine à vapeur dans ses formes et dans ses organes; il importe de serrer cet examen de plus près et d'étudier les phénomènes intimes qui sont la cause même du mouvement, c'est-à-dire la manière dont se comporte la vapeur à l'intérieur du cylindre.

La vapeur introduite dans le cylindre agit par sa pression sur toutes les surfaces avec lesquelles elle est en contact : elle presse sur les parois du cylindre, elle presse également sur le piston, qui cède devant elle en développant le travail demandé à la machine. Le jeu des pressions de la vapeur a été étudié depuis longtemps et dans tous ses détails; le procédé d'investigation, aussi précis qu'ingénieux, dont on se sert dans ces sortes de recherches, a été imaginé par James Watt : c'est le tracé graphique ou *diagramme*, obtenu à l'aide de l'*indicateur*, qui porte le nom de son illustre auteur. Le diagramme donne, pour chaque position du piston, la valeur correspondante de la pression dans le cylindre; il permet de mesurer à chaque instant cette pression, d'en définir toutes les variations. A cet égard, le problème expérimental peut être considéré comme résolu.

Mais ce n'est pas seulement par sa pression que la vapeur agit sur le récipient qui la renferme. D'autres actions interviennent, qui jouent un rôle de première importance : nous voulons parler de la chaleur que la vapeur a empruntée à la chaudière. Au point de vue thermique, les parois sont loin d'être comme des corps inertes à l'égard de la

vapeur qui est en contact avec elles : entre la vapeur et la paroi, il se produit des communications de chaleur incessantes, variables d'un instant à l'autre et d'un point à l'autre de la paroi. Ces communications sont d'autant plus actives, que la vapeur est un corps éminemment condensable et que la paroi est presque toujours humide; on n'a pas ici affaire à un gaz permanent, dont la conductibilité, tant intérieure qu'extérieure, est faible et qui ne transmet que lentement la chaleur; le phénomène dont il s'agit se rattache aux échanges de chaleur, beaucoup plus intenses et énergiques, qui s'opèrent entre un liquide et les corps qu'il mouille. Cette influence si décisive des parois a été fort longtemps méconnue ou tout au moins négligée. On admettait que, dans le fonctionnement d'une machine, la vapeur conserve constamment la même chaleur sans perte ni déficit, sans rien emprunter ni communiquer au cylindre ou au piston; bien plus, on admettait que la température de cette vapeur reste toujours la même, qu'elle agit à la façon d'un gaz permanent maintenu à température constante. Ces hypothèses, plus ou moins explicites, plus ou moins nettes dans l'esprit des praticiens, servaient de base aux calculs relatifs à l'établissement des appareils à vapeur. Les vérifications expérimentales étaient rares, les essais méthodiques et précis n'étaient pas encore entrés dans la coutume des ateliers ni dans le contrôle de réception des machines, de sorte que l'inexactitude de ces hypothèses demeura longtemps inaperçue. Néanmoins quelques esprits perspicaces avaient conçu des doutes et entrevu la vérité; citons notamment les travaux de l'éminent ingénieur des mines, Combes (1843), qui datent d'un demi-siècle, ceux de Thomas, professeur à l'École centrale, du contre-amiral Pâris et de quelques autres chercheurs.

Le vrai moyen de tirer la question au clair était évidemment de vérifier les faits; l'expérience était seule capable de dissiper les obscurités. Ç'a été le grand mérite de Gustave-Adolphe Hirn d'être entré avec décision dans cette voie, d'avoir demandé à l'expérience d'éclairer les théories obscures de la machine à vapeur. Nous n'avons pas ici à décrire ces expériences, qui furent entreprises, il y a plus de vingt années, par Hirn, sous les auspices de la Société industrielle de Mulhouse : elles sont demeurées célèbres. C'était la première fois que l'on essayait de soumettre à l'expérimentation rigoureuse et précise des laboratoires de physique les puissants appareils de l'industrie. Hirn se proposa, d'une part, de mesurer le travail développé par une machine à vapeur et de définir les circonstances dans lesquelles il se produit; d'autre part, de supputer exactement ce que devient la chaleur apportée par la vapeur. La première partie du problème était résolue par le procédé classique des diagrammes d'indicateur. Les mesures de chaleur exigeaient au contraire la création d'instruments nouveaux et de méthodes calorimétriques inconnues jusqu'alors. Ce ne fut qu'après dix années de recherches, poursuivies avec une persévérance infatigable, que Hirn parvint à surmonter les difficultés de ces expériences délicates. Le résultat fut extrêmement net : d'une part, on constata la disparition d'une partie de la chaleur équivalant au travail développé sur le piston; cette vérification éclatante du principe fondamental de

la thermodynamique apporta à cette science encore nouvelle une consécration dont elle ne pouvait se passer; d'autre part, il fut établi d'une manière péremptoire que, dans le cylindre d'une machine à vapeur, il se produit des échanges incessants de chaleur entre la vapeur et les parois qui l'enferment, ou tout au moins la couche d'humidité qui couvre ces parois.

Ces résultats sont en eux-mêmes de la plus haute importance; mais Hirn, par ses expériences, a rendu à la science un autre service non moins précieux : il a fondé et construit de toutes pièces une méthode d'expérimentation générale et complète, qui peut être appliquée presque sans changement à toute machine thermique; il a montré comment il faut établir la comptabilité de la chaleur, comment on mesure le montant des différents chapitres entre lesquels cette chaleur se répartit; comment ces comptes se complètent et vérifient entre eux.

De nombreux chercheurs se sont lancés dans la voie que Hirn avait ouverte. Il faut citer au premier rang les collaborateurs de l'illustre physicien, devenus ses amis et ses continuateurs. Mais ils n'ont pas été les seuls : dans tous les pays de l'ancien ou du nouveau continent, les divers types de machines à vapeur ont été soumis par des savants distingués à l'analyse calorimétrique inaugurée par Hirn. La masse de chiffres et de matériaux ainsi réunis en quelques années est considérable.

Est-ce à dire pour cela que tout soit terminé, qu'il ne reste plus rien à éclaircir dans ce problème si compliqué du fonctionnement de la machine à vapeur? Il est malheureusement bien loin d'en être ainsi. Les expériences dont il s'agit ont porté le jour sur certains points importants; l'influence prédominante des parois a été mise notamment hors de cause, mais il demeure encore bien des obscurités. Si, sur une machine donnée, en appliquant, avec des soins convenables, la méthode expérimentale de Hirn, on peut arriver à doser exactement les quantités de chaleur qui entrent en jeu, on est beaucoup moins avancé lorsqu'il s'agit de prévoir ce qui se passera dans une machine non encore construite et dont on a à étudier le projet. L'analyse des phénomènes ne présente pas de difficulté, la synthèse est encore à faire.

Il faut dire aussi que les influences qui interviennent dans les échanges de chaleur sont très nombreuses et très variables d'un cas à l'autre; il y a à compter avec la pression à l'admission et à l'échappement, avec les conditions de la distribution, la vitesse de la machine, les formes et dimensions des parois, leur nature, etc. L'action particulière de chacun de ces facteurs est loin jusqu'ici d'avoir été déterminée, même par approximation.

Essayons de définir avec un peu de précision l'état actuel de nos connaissances en cette matière.

Lorsque l'on a à établir le calcul d'un appareil à vapeur, deux chiffres principaux sont à déterminer : la puissance disponible et la consommation de vapeur.

Supposant données les dimensions principales d'une machine à vapeur, on a la possibilité de calculer la puissance qu'elle pourra développer à une allure déterminée;

ce calcul peut se faire avec une certaine exactitude et ne donne guère lieu à de graves mécomptes, surtout lorsqu'il est possible de l'appuyer sur l'exemple de machines déjà expérimentées, ayant de l'analogie avec celle qu'il s'agit de calculer. Toutefois on ne saurait compter sur une exactitude parfaite; en matière de machines à vapeur, les prévisions, en ce qui concerne le travail, n'atteignent pas une précision aussi grande qu'en matière de machines hydrauliques usuelles, telles, par exemple, que les pompes, les roues ou les turbines.

Pour ce qui concerne la consommation de vapeur, toutes les tentatives pour la calculer d'une manière rationnelle ont jusqu'ici échoué; ce calcul ne s'établit que sur des bases purement empiriques, par comparaison avec les résultats constatés sur des machines déjà éprouvées, et il est plus incertain encore que celui par lequel on cherche à déterminer la puissance; les causes susceptibles d'influer sur la consommation sont souvent obscures et difficiles à démêler; il arrive que deux machines, qui paraissent identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, donnent lieu à des consommations différentes; des changements qui peuvent sembler insignifiants dans les dispositions d'une machine entraînent parfois des variations importantes dans la quantité de vapeur qu'elle dépense.

Au milieu des obscurités nombreuses dont cette question est entourée, les essais multipliés exécutés par Hirn ou après lui et suivant sa méthode ont dégagé un certain nombre de faits, que l'on peut considérer comme bien établis, quoiqu'il soit impossible d'en chiffrer l'importance.

En premier lieu, il est bien démontré que la méthode autrefois usitée pour prévoir la consommation de vapeur donne toujours des résultats inexacts. Cette méthode consistait à calculer le poids de vapeur dépensé par le produit de deux facteurs : le volume à l'admission et le poids spécifique de la vapeur admise. Elle supposait que la vapeur, pendant l'admission, se comporte comme un gaz permanent. Or il n'en est rien : il y a toujours condensation sur les parois; par conséquent, le chiffre, établi comme il est dit plus haut, est nécessairement trop faible. Mais dans quelle proportion? C'est ce qu'il est jusqu'ici impossible de préciser; tout ce que l'on peut dire, c'est que l'expérience a fourni quelques données, les unes assez certaines, les autres encore douteuses, toutes manquant de la précision indispensable pour servir de base à un calcul correct.

Parmi les causes qui tendent à augmenter la condensation à l'admission, et, par suite, la consommation de vapeur, il faut citer :

L'abaissement de la pression à l'échappement;

L'élévation de la pression à l'admission;

Une détente prolongée.

Il semble en outre démontré que cette condensation est une question de surface, que, toutes choses égales, elle augmente en même temps que la surface des parois offertes, lors de l'admission, au contact de la vapeur.

Parmi les causes qui tendent à réduire cette condensation, on peut mentionner les suivantes :

Le réchauffement des parois, soit par une enveloppe de vapeur, soit par l'usage de la vapeur surchauffée, soit par une compression du fluide restant dans le cylindre, obtenue par la fermeture anticipée de l'échappement;

Une grande vitesse du piston;

La détente dans plusieurs cylindres successifs.

Il semble résulter d'expériences toutes récentes que la matière même de la paroi, et principalement la constitution des surfaces en contact avec la vapeur, exercent une influence notable; le mode de graissage et la nature du lubrifiant seraient loin d'être indifférents.

Ce n'est pas seulement pendant l'admission que les parois interviennent; leur action s'exerce pendant toute la course, soit directe, soit rétrograde du piston; la chaudière, les conduites de vapeur, le cylindre, les conduites d'échappement et le condenseur, s'il y en a, forment dans leur ensemble un vaste récipient, dont les différentes parties ont entre elles des communications incessamment variables, dont les surfaces sont à des températures différentes et changeant constamment. Des effets de vaporisation et de distillation se produisent donc sans cesse, d'un point à l'autre, en vertu du principe connu des physiciens sous le nom de *principe de la paroi froide*. Tous ces phénomènes sont extrêmement complexes et fort mal connus jusqu'ici. Aussi l'incertitude est grande; des points capitaux de la théorie de la machine à vapeur restent douteux et sont encore en discussion.

Nous examinerons rapidement quelques-uns de ces points, qui ont fait l'objet d'études intéressantes, et nous résumerons rapidement les faits qui semblent acquis, ou du moins probables, laissant de côté les discussions théoriques, parfois fort ardentes, qui se sont élevées à leur sujet.

Il semble hors de doute que le procédé le plus efficace pour obtenir une bonne utilisation mécanique de la chaleur consiste à maintenir chaude et aussi sèche que possible la paroi intérieure du cylindre. L'usage de la vapeur surchauffée paraît être un moyen simple et actif de réaliser ces conditions. Il a été proposé à plus d'une reprise; Hirn en a fait l'objet d'études détaillées et d'applications étendues. Malgré les succès obtenus dans cette voie par l'illustre mécanicien, le procédé ne s'est pas répandu dans la pratique. Nous avons vu précédemment les raisons de cet échec; la principale est la difficulté d'assurer le graissage, malgré les variations inévitables du degré de surchauffe. Toutefois la question ne doit pas être considérée comme définitivement tranchée; les lubrifiants minéraux possèdent une stabilité que ne présentaient pas les corps gras organiques autrefois employés, et il ne paraît plus impossible de trouver des modes de graissage qui résistent à l'action de la vapeur surchauffée. Le sujet vaut la peine d'être examiné; la solution serait fort simple et aurait l'avantage de débarrasser la machine à vapeur d'accessoires coûteux et encombrants.

L'enveloppe de vapeur donne, dans la pratique, des résultats économiques incontestables, d'autant plus marqués que les conditions de marche de la machine sont plus propres à provoquer des condensations à l'admission et des distillations ultérieures. Toutefois l'action de l'enveloppe est obscure sur plus d'un point, et il est difficile, dans chaque cas, de prévoir en chiffres l'importance des économies qu'elle peut procurer. Lorsqu'il s'agit de machines à plusieurs cylindres, la difficulté est encore plus grande; on n'est nullement fixé sur des points fort importants : convient-il de mettre une enveloppe à chaque cylindre ou seulement à quelques-uns d'entre eux, et auxquels? Faut-il mettre dans les enveloppes de la vapeur vierge venant de la chaudière, ou de la vapeur détendue, ou de la vapeur surchauffée, etc.? Ces questions restent dans le doute, et il ne paraît pas qu'elles aient fait de notables progrès dans les dernières années.

La compression de la vapeur à la fin de la course rétrograde du piston est considérée comme un procédé fort utile pour atténuer la consommation de vapeur, mais on n'est pas fixé sur le degré de compression : la pression finale doit-elle atteindre la pression à l'admission ou rester au-dessous, et de combien? Et les discussions d'aller leur train.

Des discussions non moins vives se sont élevées à propos de la comparaison économique entre les machines monocylindriques à distribution perfectionnée et les machines à expansion multiple. Il est utile de résumer en quelques mots l'état actuel de la question.

Les machines compound, à double et triple expansion, ont donné, dans leurs applications à la navigation, les plus remarquables résultats; pour les manufactures, on a longtemps reculé devant l'usage de la détente par cascade, si ce n'est sous la forme de machines Woolf à balancier; au contraire, dans les installations fixes, le système Corliss ou ses dérivés ont obtenu le plus grand succès. Comme dépense de vapeur, les deux systèmes compound et Corliss donnent des résultats à peu près équivalents; avec l'un et l'autre, dans des essais soignés, on a obtenu des consommations de 7 kilogrammes de vapeur et même moins encore par heure et par cheval indiqué, chiffre voisin du minimum fixé par la théorie et qui ne laisse qu'une marge assez maigre à des améliorations ultérieures.

Pourquoi chacun de ces deux systèmes reste-t-il cantonné à peu près exclusivement dans ses applications spéciales, l'un à la navigation, l'autre dans les manufactures? Il faut en chercher les motifs dans les conditions différentes des services à faire dans l'un et l'autre cas.

Dans un atelier, les outils que le moteur doit entraîner offrent une résistance constamment variable, et néanmoins la vitesse doit s'écarter fort peu d'une valeur moyenne et déterminée; les machines monocylindriques satisfont à cette double exigence : les variations périodiques du moment moteur sont absorbées par un puissant volant; les

variations durables du moment résistant sont compensées par l'action d'un régulateur, qui peut être rendu fort sensible.

Avec les machines compound, l'action du régulateur est moins prompte, mais, en matière de navigation, la chose n'a pas autant d'importance; le véritable régulateur, c'est ici le propulseur, dont la résistance varie très rapidement en même temps que la vitesse de rotation; on n'a donc pas à craindre les variations permanentes d'allure. Il en est tout autrement des variations périodiques : si le moment moteur n'est pas d'une constance suffisante, la poussée du propulseur change incessamment, et il en résulte des trépidations, qui entraînent une destruction rapide de l'appareil; ces effets fâcheux ne sauraient d'ailleurs être amortis par un volant, organe lourd et encombrant, qui n'est pas à sa place sur un navire. Il est donc nécessaire que l'arbre de couche soit attaqué par plusieurs cylindres s'équilibrant autour de son axe; dès lors la machine compound est tout indiquée, avec ses organes rustiques, sa distribution simple et la légèreté de sa transmission, qui n'a pas à subir les efforts très inégaux dus à une expansion prolongée dans un seul cylindre.

Lorsqu'il s'agit de machines monocylindriques, on comprend facilement qu'une distribution perfectionnée procure des économies notables.

Mais comment se fait-il qu'une machine compound, dont la distribution est faite par des organes en général fort simples, dont les multiples cylindres donnent lieu à des pertes de charge nombreuses et à des frottements importants, comment se fait-il qu'une pareille machine puisse fournir des résultats économiques au moins aussi satisfaisants que les meilleures machines à distribution perfectionnée? Les raisons qu'on a essayé d'en donner manquent de précision et de certitude; les faits sont là, mais imparfaitement expliqués. Nous aurons d'ailleurs à revenir sur ce point important.

La machine à un cylindre pour les ateliers, la machine compound pour la marine, telle était la situation il y a peu d'années. Il semble que cet état de choses tende à se modifier : les conditions nouvelles imposées à certaines industries se rapprochent beaucoup de celles que l'on rencontre dans la marine; aussi la détente par échelons commence-t-elle à être pratiquée, même pour les installations fixes. Elle s'est même assez répandue dans les chemins de fer, et un grand nombre de locomotives figurant à l'Exposition de 1889 étaient munies de cylindres compound. Cette application du système à des machines à échappement libre ne saurait évidemment procurer des économies aussi importantes que lorsque l'échappement se fait dans un condenseur; elle apparaît plutôt comme une conséquence de l'élévation de la pression, qui atteint aujourd'hui, pour les locomotives, les chiffres élevés de 12 et 15 kilogrammes effectifs.

Dans quelques-unes des machines de l'Exposition, on avait combiné les deux systèmes rivaux : deux ou trois cylindres, recevant l'un de l'autre la vapeur en cascade, étaient munis de distributions à déclenchement. Il est difficile, avant expériences précises, d'apprécier les avantages de pareils dispositifs. Chacun des deux systèmes pris isolément peut, s'il est bien appliqué, donner lieu à une consommation fort réduite,

s'approchant des limites infranchissables assignées par les principes de la physique; leur combinaison permet sans doute de pousser l'économie plus loin, mais pas beaucoup plus loin; il reste à savoir si cette faible économie l'emportera sur les inconvénients d'une complication plus grande.

On a pu voir, par ce qui précède, combien est difficile cette question du mode d'action de la vapeur dans les machines motrices; en dépit des recherches, des études, des expériences multipliées, bien des incertitudes, bien des obscurités subsistent encore; il semble même que, loin d'avancer, on piétine sur place; ce qui paraissait clair devient trouble, ce qui paraissait sûr est devenu douteux. Mais c'est la marche ordinaire des sciences dans leurs périodes de transformation; pour être encore latent, le progrès n'en est pas moins réel. Ces travaux, si nombreux, si patiemment poursuivis, ont du moins une utilité; les chiffres qu'ils fournissent sont des matériaux, encore à l'état brut et dispersé, mais qui sans doute serviront un jour à édifier d'une manière solide la théorie définitive de la machine à vapeur.

Avant d'aborder la description des machines qui figuraient à l'Exposition de 1889, il importe d'étudier d'une manière générale la question importante de la distribution de vapeur, et les propriétés des divers dispositifs qui sont en usage pour assurer la distribution.

L'objet de toute distribution, c'est de mettre les deux fonds du cylindre successivement en communication avec la vapeur venant de la chaudière et avec l'échappement.

Si l'on considère ce qui se passe dans une machine entre un des fonds du cylindre et la face correspondante du piston, on remarque que, pendant une révolution complète, le piston décrit deux fois sa course, une fois à l'aller, une fois au retour; dans le même temps, l'admission d'une part, l'échappement de l'autre, s'ouvrent et se ferment alternativement. Les positions qu'occupe le piston aux instants où ont lieu l'ouverture et la fermeture des orifices ont une grande importance; les périodes correspondantes ont reçu des dénominations spéciales :

Pendant la course directe, la période qui s'étend jusqu'à la fermeture de l'arrivée de vapeur s'appelle l'*admission;* de ce point à l'ouverture de l'échappement, c'est la *détente;* de là à la fin de la course, c'est l'*avance à l'échappement.*

Pendant la course rétrograde, la période s'étendant jusqu'à la fermeture de l'échappement est l'*échappement;* de là à l'ouverture de l'admission, c'est la *compression;* de là à la fin de la course, c'est l'*avance à l'admission.*

Les proportions de ces différentes périodes ont une influence capitale sur la puissance de la machine et l'effet utile de la vapeur; et ces proportions doivent varier beaucoup d'un cas à l'autre, suivant les dispositions et l'allure de la machine. Jusqu'ici on est loin d'être fixé sur les valeurs les plus avantageuses à donner à chacune des périodes dans chaque cas particulier. On a déjà vu, pour ce qui concerne la détente, qu'elle doit, en général, être plus prolongée lorsque la machine est à condensation et

qu'elle reçoit de la vapeur à haute pression. Nous avons fait remarquer que les données que l'on possède sur la compression sont encore vagues et insuffisantes. Quant aux avances, il est certain qu'elles doivent être d'autant plus fortes que la vitesse de rotation est plus grande et que les lumières ont des dimensions plus faibles; l'avance à l'échappement, en particulier, doit croître très vite avec la vitesse de l'allure, sous peine de créer en arrière du piston des contre-pressions extrêmement nuisibles.

Lorsqu'il s'agit d'établir une distribution, la première chose à faire est de fixer la durée des six périodes principales que nous venons de définir; faute de méthodes suffisamment assises, on en est réduit le plus souvent à faire cette détermination au sentiment, ou bien, lorsque c'est possible, d'après les résultats constatés sur des machines déjà construites. Il s'agit ensuite de combiner les organes qui assurent la répartition ainsi établie. Malgré sa complication, ce dernier problème est relativement facile et susceptible d'un grand nombre de solutions, plus ou moins appropriées aux différents cas. L'imagination des inventeurs s'est largement exercée sur ce problème attrayant, et l'on compte au moins autant de systèmes de distribution que de constructeurs. Pour débrouiller cet ensemble touffu, il convient d'examiner séparément chacun des éléments principaux qui constituent une distribution.

Ces éléments se répartissent en trois groupes distincts d'organes, que l'on retrouve dans toute distribution, à savoir :

Les *lumières,* qui donnent passage à la vapeur;

Les *obturateurs* ou distributeurs, qui font, en temps utile, communiquer ces lumières, soit avec l'admission, soit avec l'échappement;

La *transmission,* à l'aide de laquelle le mouvement, pris sur un des organes de la machine, est communiqué aux obturateurs.

Chacun de ces groupes d'organes est lui-même susceptible d'affecter un grand nombre de dispositions diverses; de là une variété infinie de distributions.

Dans certaines machines, les lumières d'admission sont distinctes des lumières d'échappement, le cylindre est percé de quatre lumières; chacune d'elles est munie d'un obturateur spécial. C'est le dispositif adopté dans les types Corliss, Sulzer et dérivés. Souvent aussi le cylindre ne comporte que deux lumières, qui servent successivement à l'admission et à l'échappement. Le système des deux lumières à double fonction est simple, mais il présente un inconvénient qui, dans certains cas, peut devenir sérieux : c'est d'augmenter les surfaces exposées au contact de la vapeur, ce qui, comme on l'a vu, tend à exagérer les condensations à l'admission et leurs conséquences fâcheuses.

Ce dispositif comporte lui-même deux variétés : quelquefois les deux lumières sont très courtes et n'ont que la longueur nécessaire pour traverser la paroi du cylindre; en pareil cas, le distributeur est aussi long que le cylindre; ou bien la distribution est opérée par deux obturateurs distincts. Dans beaucoup de machines, la disposition contraire est adoptée : le distributeur est unique et de petites dimensions, ce qui le rend

léger et facile à mouvoir; et pour obtenir ce résultat, on a dû allonger les lumières et les recourber, de manière que leurs orifices viennent déboucher tout près l'un de l'autre; fréquemment ces orifices comprennent entre eux la naissance de la conduite d'échappement; sur toutes les locomotives, la distribution est disposée de cette façon.

Ce dernier dispositif, deux lumières à orifices rapprochés, ne laisse pas que de présenter certains inconvénients, surtout dans les machines à allure rapide si usitées aujourd'hui. Et en effet, la section des lumières doit être proportionnée à la vitesse du piston; plus grande est cette vitesse, plus larges doivent être les passages offerts à l'écoulement de la vapeur; on en arrive ainsi, dans les machines rapides, à donner aux lumières des sections considérables qui atteignent le dixième de l'aire du piston ou même une proportion plus grande encore. Dans ces conditions, les lumières longues ayant une grande section ont un fort grand volume, lequel augmente d'une façon démesurée ce que l'on appelle *les espaces nuisibles*. Ces effets sont combattus par divers artifices, notamment par l'augmentation de la période de compression.

Passons aux obturateurs. On peut les diviser en deux catégories:

Les *obturateurs levants*, dont le mouvement est perpendiculaire à l'orifice à découvrir;

Les *obturateurs glissants*, qui se déplacent sur une glace polie, dans laquelle s'ouvre l'orifice.

Le plus simple des obturateurs levants est la soupape ordinaire. On l'emploie beaucoup dans les machines à gaz. Au contraire, elle est très peu usitée comme distributeur pour les machines à vapeur; c'est que, pour cet emploi, elle présente un grave inconvénient : la force nécessaire pour soulever un pareil obturateur est proportionnelle à la différence des pressions qui agissent sur ses deux faces; cette force, même pour une soupape de dimension médiocre, serait considérable, et nécessiterait des organes de transmission très robustes et lourds à manœuvrer. Le procédé employé pour échapper à cette difficulté est connu depuis fort longtemps; il consiste à monter sur un même axe deux soupapes parallèles, ayant des diamètres presque égaux et rendues solidaires l'une de l'autre; les communications sont établies de telle sorte qu'une même pression, celle par exemple de la vapeur affluente, règne sur les deux faces extérieures du système, tandis que les faces intérieures sont baignées par le fluide à basse pression; de cette façon, les pressions s'équilibrent presque complètement sur l'ensemble et il suffit d'un faible effort pour le soulever. Dans les applications, on laisse une légère prépondérance à la pression la plus forte, de manière à appuyer l'organe sur son siège.

Tel est le distributeur connu sous les noms de *soupape équilibrée, soupape à double siège* ou *soupape de Cornouailles*. Il possède deux propriétés intéressantes : il n'oppose qu'une faible résistance au mouvement; en outre, le double siège présentant un grand développement linéaire, il suffit d'une faible levée pour ouvrir à la vapeur de larges

passages. Il résulte de tout cela que la commande de cet organe peut être faite par une transmission fort légère.

La soupape à double siège est fort ancienne; elle a été appliquée d'abord aux machines d'exhaure des mines de Cornouailles, puis à un grand nombre de machines d'épuisement ou d'élévation d'eau. Dans ces machines, qui étaient à simple effet, la soupape était, comme aujourd'hui, manœuvrée par un système de cames et de déclics. La soupape de Cornouailles était peu en usage pour les machines ordinaires de l'industrie; on lui reprochait de n'être étanche qu'à la condition d'être exécutée d'une manière irréprochable, et de ne pas conserver longtemps son étanchéité. MM. Sulzer frères, de Winterthur, ont repris la question et, par des études persévérantes, sont parvenus à faire de la soupape à double siège un distributeur à la fois léger, facile à manœuvrer, fort simple, très étanche et très durable; c'est ce distributeur qu'ils appliquent dans leurs admirables machines, qui ont eu un succès si remarquable et qui ont été reproduites par un grand nombre d'excellents constructeurs.

L'obturateur glissant est d'un usage beaucoup plus fréquent que l'obturateur levant. Dans son mouvement de glissement, il doit rester appliqué sur la glace dans laquelle s'ouvre l'orifice à découvrir; par suite, la surface commune de contact est nécessairement de révolution autour d'un axe perpendiculaire au mouvement. Comme cas particulier, l'axe de révolution peut être à l'infini; la surface devient cylindrique ou plane, et le mouvement de l'obturateur est rectiligne et alternatif; c'est le dispositif le plus ordinaire : la plupart des machines de terre ou de navigation, de même que les locomotives, ont leur distribution faite par un tiroir à mouvement alternatif se déplaçant parallèlement à une glace plane.

Comme type très usité des dispositifs de cette nature, on peut citer le *tiroir en coquille;* c'est une sorte de boîte sans couvercle, dont les bords ou *barrettes,* bien dressés, s'appuient en glissant sur la glace et forment avec elle joint étanche; le tiroir est enveloppé par la vapeur vive venant de la chaudière; le creux du tiroir couvre un orifice communiquant avec l'échappement et placé entre les orifices des lumières qui aboutissent aux deux fonds du cylindre; le mouvement alternatif du tiroir met successivement chacune des lumières en relation, soit avec la vapeur vive, soit avec le creux du tiroir, c'est-à-dire l'échappement.

Les distributions établies dans ce système sont simples de construction, robustes et durables. La pression qui applique le tiroir sur la glace assure une bonne étanchéité. Dans certains cas même, cette pression est tellement grande qu'elle devient fort gênante. La force qui appuie un tiroir est égale au produit de l'aire du tiroir par la différence des pressions qui s'exercent sur ses deux faces. Or, avec les grandes vitesses aujourd'hui en usage, les lumières sont très larges et la surface du tiroir devient considérable; sous des pressions un peu fortes, on en arrive à des efforts énormes exercés sur le dos du tiroir; c'est sous ces efforts que le distributeur doit glisser. Les frottements absorbent

ainsi un travail important, dont la plus grande partie se traduit par l'usure et souvent le grippement des pièces frottantes.

Ces inconvénients sont fort graves, il a fallu y porter remède; on y parvient en réduisant les deux facteurs du travail absorbé par le frottement, savoir : le déplacement du tiroir et la pression qui l'appuie sur la glace.

Pour réduire la course du tiroir, le moyen ordinairement employé consiste à donner aux orifices des lumières sur la glace la forme d'un rectangle très étroit dans le sens du mouvement, très allongé dans le sens perpendiculaire. On fait aussi usage de tiroirs dits *à jalousie* ou *à grille;* c'est une plaque percée d'un certain nombre d'orifices, séparés par des intervalles d'une largeur un peu plus grande; la glace comporte des orifices correspondants; si l'on déplace le tiroir de la largeur d'un seul orifice, tous les passages sont fermés à la fois; la manœuvre inverse ouvre une section d'écoulement égale à la somme des aires des orifices.

Pour diminuer la force qui presse le tiroir sur sa glace, il suffit de réduire l'étendue de la surface sur laquelle s'exerce la pression; à cet effet, le dos du tiroir est façonné en forme d'un plan bien dressé et parallèle à la glace sur laquelle il glisse; sur ce plan viennent s'appuyer à joint étanche les bords d'un cadre, dont l'intérieur est mis en communication avec l'atmosphère ou avec le condenseur; toute l'aire entourée par ce cadre se trouve ainsi soustraite à la pression de la vapeur. L'appareil est connu sous le nom de *compensateur* et le tiroir qui en est muni s'appelle *tiroir compensé* ou *équilibré.*

D'autres procédés sont encore en usage pour atteindre le même but : tels sont les tiroirs dits *en D,* analogues, comme principe, aux tiroirs employés autrefois dans les machines à balancier de Watt.

Mais ces divers moyens d'équilibration ont presque partout, dans les machines modernes, cédé la place à un dispositif qui donne de fort bons résultats lorsqu'il est convenablement mis en œuvre; la glace plane est remplacée par un cylindre, les orifices allongés des lumières par des rainures circulaires pratiquées dans les parois de ce cylindre et mises en communication avec le cylindre de la machine; l'obturateur prend la forme d'un piston, qui parcourt le cylindre de distribution, en découvrant successivement chaque rainure à la vapeur vive ou à l'échappement; l'équilibrage ainsi obtenu est complet et les passages offerts à l'écoulement de la vapeur ont de grandes sections; l'appareil devient fort léger et se prête très bien aux grandes vitesses. Le joint à la jante de ces tiroirs-pistons est obtenu par un ajustage précis dans les petits appareils; pour les machines soignées, on fait usage de segments élastiques.

Reprenant une disposition anciennement appliquée par Maudslay et proposée antérieurement par Papin, Georges Corliss fit usage de distributeurs coniques, analogues comme principe aux clefs des robinets à boisseau, et animés d'un mouvement d'oscillation autour de l'axe du cône. Ces distributeurs exigent une construction excellente et un entretien très soigné; mais, dans ces conditions, ils fonctionnent fort bien, ils se

meuvent sans grande résistance, sont bien étanches et se prêtent bien au rattrapage du jeu. Ils ont été imités par de nombreux constructeurs.

Les robinets coniques se prêtent également à un autre agencement : on peut s'en servir pour opérer la distribution en leur imprimant, non plus un mouvement d'oscillation, mais une rotation continue autour de leur axe. Les machines exposées par la maison Biétrix offraient de beaux exemples de ce système. Il avait été proposé souvent, mais sans succès, à cause de certaines difficultés pratiques qui n'avaient pas encore été surmontées, et sur lesquelles nous reviendrons.

Si l'on considère un distributeur conique et que l'on imagine que l'angle du cône s'ouvre de plus en plus, on arrive au distributeur plan tournant autour d'un axe qui lui est perpendiculaire; dans les machines *Brotherhood* à trois cylindres, le distributeur a cette forme et il est animé d'un mouvement de rotation continue.

Pour satisfaire à certaines nécessités, et spécialement en vue d'obtenir des détentes prolongées, on a été conduit, dans certains cas, à superposer deux distributions : l'une des distributions, dite *distribution naturelle,* sert à produire l'admission et l'échappement dans les conditions ordinaires; l'autre distribution, appelée *distribution de détente,* a pour objet de supprimer l'arrivée de vapeur avant la fin de l'admission naturelle, et par conséquent de prolonger la période de détente. Dans quelques cas, le distributeur de détente est placé en avant de la boîte à vapeur, dont la communication avec la chaudière est ainsi alternativement ouverte ou supprimée. Plus souvent le système est agencé différemment : le tiroir de distribution naturelle est taillé dans un bloc, portant sur son dos une glace sur laquelle se meuvent les obturateurs de détente; ceux-ci ferment ou ouvrent des lumières percées à travers ce bloc. C'est à ce dispositif très usité que se rapportent les distributions connues sous les noms de *Farcot, Meyer,* etc.

La *transmission* destinée à communiquer le mouvement aux distributeurs, offre, dans les machines modernes, des variétés extrêmement nombreuses. Ici encore une classification s'impose; nous pouvons établir trois catégories principales :

Les transmissions desmodromiques;

Les transmissions par déclenchement;

Les transmissions diverses.

Le terme *desmodromique,* introduit récemment dans le vocabulaire des mécaniciens, est fort expressif, et le sens en est très précis. La transmission de mouvement entre deux points mobiles est dite *desmodromique,* lorsqu'elle est opérée par des organes rigides et à liaison complète, de telle sorte que le mouvement de l'un des points étant donné, le mouvement de l'autre point soit entièrement et obligatoirement défini; ainsi la transmission entre les différents points d'un train d'engrenages sans jeu est desmodromique.

Comme type très net de commande de cette nature, on peut citer l'ensemble des

organes qui relient le piston à l'arbre de couche et transforment ainsi le mouvement rectiligne de l'un en mouvement de rotation continue de l'autre.

Dans un grand nombre de machines, c'est par une transmission tout à fait analogue à celle-ci que la rotation de l'arbre de couche agit sur le distributeur et lui communique le mouvement rectiligne alternatif qui produit la distribution. Cette transmission se compose, comme la précédente, d'une manivelle tournant avec l'arbre, d'une bielle et d'une tige guidée; la seule différence réside dans les proportions des pièces : la tige et la bielle sont plus légères; la manivelle n'a qu'un petit rayon et on lui donne fréquemment la forme si connue d'*excentrique circulaire;* la grosse tête de bielle est alors remplacée par un *collier d'excentrique.*

Ce système de commande agissant sur un tiroir en coquille constitue le type le plus répandu de distribution, aussi bien pour les machines terrestres que pour la navigation et les locomotives. Il comporte d'ailleurs de nombreuses variétés : le tiroir est équilibré, ou en forme de *D* ou de piston, ou bien il est à jalousie; la transmission comporte des leviers intermédiaires, droits ou coudés, etc. Toutes ces différences, qui ont pour objet de répondre à des convenances spéciales, n'altèrent en rien les caractères généraux de ce mode de distribution : il est simple, robuste, et s'adapte aussi bien pour les allures lentes ou modérées que pour les grandes vitesses.

L'étude géométrique de ce système si répandu a donné lieu à de nombreux travaux d'un très grand intérêt. On est parvenu, soit par des formules algébriques, soit par des tracés graphiques, à résumer et à représenter fort simplement les propriétés de ce mécanisme; des géomètres éminents se sont appliqués à ces recherches, et les méthodes qu'ils ont imaginées sont pratiquées couramment dans tous les ateliers.

Au lieu de prendre le mouvement sur l'arbre de couche à l'aide d'un excentrique, on peut également l'emprunter à la grosse tête de la bielle qui relie le piston à la manivelle, ou en un point quelconque de cette bielle; il faut alors, bien entendu, intercaler des leviers intermédiaires, de telle sorte que, pour une position donnée du piston, la situation du tiroir soit différente, suivant que le mouvement du piston est dirigé dans un sens ou dans l'autre. C'est ainsi que sont constituées les distributions *Joy, Marshall* et autres, qui offrent certains avantages au point de vue de l'agencement des organes.

Toutes ces distributions reposent sur les mêmes principes et jouissent, à peu de chose près, des mêmes propriétés géométriques; le mouvement du tiroir est sensiblement *sinusoïdal,* c'est-à-dire que ses déplacements, en fonction du temps, sont proportionnels aux ordonnées d'un sinusoïde. D'autre part, l'admission et l'échappement étant obtenus à l'aide d'un seul organe, le tiroir, ces deux phases de la distribution sont sous la dépendance étroite l'une de l'autre; il en résulte des sujétions gênantes, qui se traduisent par ce fait : c'est que le système en question cesse de donner de bons résultats dans tous les cas où la détente doit être un peu prolongée.

Sans renoncer au tiroir en coquille conduit par un excentrique circulaire, on s'est attaché à modifier la transmission et à lui donner plus d'élasticité. Ce problème a

IMPRIMERIE NATIONALE.

suscité bien des recherches et donné lieu à des solutions ingénieuses. La coulisse de Stephenson, sur laquelle nous aurons à revenir, permet de prolonger dans certaines limites la détente; mais cette solution est incomplète, le mouvement du tiroir restant à peu près sinusoïdal.

Au lieu d'attaquer directement le tiroir par la bielle d'excentrique, imaginons que la petite tête de cette bielle soit attachée à un levier articulé à ses deux extrémités sur la tige du piston et sur celle du tiroir : les déplacements du piston, reportés par le levier sur le tiroir, auront pour effet de rejeter ce dernier tantôt à droite, tantôt à gauche de la situation qu'il occuperait sans cet intermédiaire; le mouvement sinusoïdal se trouve donc considérablement modifié. Par un choix convenable des données, on arrive ainsi, sans trop grande complication, à une solution fort heureuse. Tel est le système de transmission connu sous les noms de *Walschaerts* et de *Heusinger de Waldegg*.

En rendant le distributeur d'admission indépendant du distributeur d'échappement, on fait disparaître la plus grosse difficulté du problème; c'est notamment le cas des machines à quatre lumières. C'est ici le lieu de parler d'un principe cinématique, sinon nouveau, du moins longtemps négligé, que Corliss a appliqué dans les distributions de ses machines. Dans la plupart des transmissions à mouvement alternatif, on fait usage de leviers oscillants réunis deux à deux par des tiges; les choses sont ordinairement disposées de telle sorte, que chaque bras de levier décrive un angle d'amplitude modérée et qu'il reste à peu près perpendiculaire sur la tige à laquelle il s'articule; cet agencement réduit au minimum les réactions sur les centres fixes d'oscillation; mais il a en outre une conséquence cinématique importante, c'est que les vitesses des divers points de la transmission sont entre elles dans un rapport qui reste sensiblement constant; si l'un des points du système a un mouvement sinusoïdal, tous les autres points sont animés de mouvements sinusoïdaux ou à peu près.

La commande des tiroirs Corliss est fondée sur un principe tout à fait différent : les angles décrits par les leviers sont très ouverts, et les bras des leviers, dans leurs excursions, s'approchent beaucoup de la direction des tiges auxquelles ils sont reliés, et même dépassent cette position; par suite, le rapport des vitesses des diverses pièces oscillantes est extrêmement variable; dans une excursion, il peut passer de zéro à une valeur très grande et réciproquement. Corliss a profité de cette propriété pour imprimer à ses distributeurs des vitesses très variées : le distributeur reste presque immobile pendant tout le temps où l'orifice qu'il gouverne doit demeurer ouvert ou fermé; au contraire, le distributeur se meut très rapidement pendant que l'orifice n'est qu'en partie découvert; les étranglements de vapeur sont ainsi réduits à leur minimum. Il est vrai que les efforts sur les centres fixes d'articulation se trouvent beaucoup augmentés; mais cela a peu d'inconvénient, si les résistances dues aux frottements des organes sont suffisamment réduites.

Corliss applique ce système de commande aux quatre distributeurs de ses machines; de plus, il intercale, sur la commande des distributeurs d'admission, un système de dé-

clenchement, qui en rend la fermeture encore plus rapide; mais ce n'est pas le moment d'insister sur ce point, sur lequel nous aurons à revenir. Sans nous écarter des transmissions desmodromiques, qui seules sont capables d'assurer la régularité de la distribution aux allures rapides, nous ferons remarquer quelles facilités procure la présence de quatre distributeurs distincts, actionnés chacun par une transmission spéciale pouvant être réglée séparément; toutes les sujétions qui rendent si difficile l'usage des grandes détentes, lorsqu'on veut faire la distribution par un tiroir unique, disparaissent immédiatement. De plus, le principe vulgarisé par Corliss trouve ici son application toute naturelle, et les étranglements de vapeur, qui sont si pernicieux, surtout aux allures rapides, se trouvent ainsi fort atténués. Quatre distributeurs oscillants commandés par une transmission desmodromique à rapport variable de vitesses, tel est le système de distribution dont MM. Lecouteux et Garnier ont muni leurs belles machines à grande vitesse, destinées à actionner les dynamos pour l'éclairage électrique.

Pour terminer ce qui concerne la transmission desmodromique des distributeurs, il convient de rappeler les distributions de la maison Biétrix, dans lesquelles l'arbre de couche commande, par engrenages, un distributeur à rotation continue.

Dans la transmission desmodromique, l'organe de la machine, arbre, bielle ou autre, sur lequel est prise la commande, étant animé d'un mouvement continu, il s'en suit nécessairement que le mouvement du distributeur est également continu, c'est-à dire qu'il ne comporte pas d'arrêt; la vitesse varie par degrés insensibles : même aux environs des points morts, elle passe progressivement du positif au négatif, sans s'arrêter à zéro, si ce n'est pendant un temps infiniment petit. Or cette continuité du mouvement entraîne certaines conséquences, qui ne sont pas sans importance.

Il en résulte, en premier lieu, que la transmission desmodromique s'applique mal aux distributeurs levants; ces obturateurs ne donnent la fermeture que lorsqu'ils sont absolument appliqués sur leur siège, position entièrement fixe et déterminée; c'est-à-dire que, sous l'action de la commande en question, les orifices de passage de la vapeur ne resteraient fermés que pendant un temps infiniment petit. Or ces conditions sont absolument contraires à celles d'une distribution : chaque lumière ne doit rester ouverte que pendant une fraction de la révolution de la machine, fraction souvent très petite, s'il s'agit des lumières d'admission et que la détente soit un peu longue. Cette immobilité prolongée de l'organe est incompatible avec le caractère même de la commande desmodromique.

Il n'en est pas de même en ce qui concerne les distributeurs glissants; ils peuvent se déplacer plus ou moins au delà de la position pour laquelle la fermeture est complète sans que, pour cela, l'orifice soit découvert; il suffit que la barrette, par laquelle le distributeur est en contact avec la glace, ait une largeur plus grande que la lumière et la déborde d'un *recouvrement* suffisant.

Néanmoins, à prendre les choses au point de vue absolu, le mouvement continu

d'un tiroir semble, *a priori,* n'être pas le mieux accommodé aux conditions d'une distribution parfaite; on peut trouver avantage à donner au distributeur un mouvement saccadé, qui serait constitué comme il suit : deux temps d'arrêt, correspondant à la fermeture complète et à l'ouverture complète de la lumière; dans l'intervalle, un déplacement très rapide, réduisant au minimum la durée de la fermeture partielle, pendant laquelle le passage de la vapeur est étranglé.

Il est vrai que la commande desmodromique convenablement agencée permet, comme on l'a vu, de réaliser à peu près ces conditions. Néanmoins cela n'a pas paru toujours suffisant; on s'est préoccupé, et depuis fort longtemps, de résoudre par d'autres voies ce problème difficile; de nombreuses solutions ont été proposées; la plupart sont tombées dans l'oubli; quelques-unes ont survécu, et l'Exposition de 1889 en présentait d'intéressants spécimens. Nous en étudierons quelques exemples.

De toutes ces solutions, celle qui a eu les plus beaux succès et qui a le mieux conservé la faveur du public, c'est la transmission par *déclenchement.* Voici le principe sur lequel elle est fondée.

Supposons qu'il s'agisse d'un distributeur d'admission; ce distributeur est sous l'action permanente d'une force extérieure, un ressort le plus souvent, qui tend à le ramener à la position de fermeture; il reçoit en outre son mouvement d'un organe de la machine, un excentrique par exemple, par l'intermédiaire d'une transmission; mais cette transmission est coupée en deux parties, dont la continuité est rétablie par une clenche facile à déplacer; si, par contact avec un butoir fixe, cette clenche vient à sauter, la transmission manque, et le distributeur est brusquement ramené par le ressort à la position de fermeture. Ce mouvement de rappel serait lui-même trop brusque et produirait des chocs destructeurs; on le modère par l'interposition d'un *dash-pot,* sorte de frein constitué par un petit piston pressant sur un coussin d'air ou de liquide.

Le système est loin d'être nouveau : dans les premières machines à distribution automatique, celles construites par Newcomen il y a près de deux siècles, les distributeurs étaient actionnés par déclenchement. L'idée fut reprise et appliquée par un grand nombre d'ingénieurs; citons, entre beaucoup d'autres, Bourdon, du Creusot, Frédéric Sickles, ingénieur américain, qui se fit breveter pour ce système en 1841, etc. En 1849, Georges Corliss imagina de compléter le dispositif en gouvernant la détente par le régulateur à force centrifuge. A l'Exposition internationale de 1867, deux superbes machines se partageaient l'admiration des visiteurs : l'une était de Corliss, l'autre des frères Sulzer. Fort différentes à tous égards, ces deux machines se ressemblaient par un point : la commande du distributeur par déclenchement avec détente variable par le régulateur. Dans les machines dont il s'agit, de même que dans toutes celles dérivées de ces premiers types, le déclenchement n'est appliqué qu'à la fermeture de l'admission au commencement de la détente : à ce moment, le piston, ayant décrit une partie de sa course, a déjà acquis une certaine vitesse; les étranglements

de vapeur auraient donc une action fâcheuse, et il importe d'en réduire la durée. Au contraire, l'ouverture de l'admission, ainsi que l'ouverture et la fermeture de l'échappement ont lieu quand le piston est tout près de la fin de sa course et n'a qu'une vitesse faible; il y a moins d'intérêt à opérer avec une extrême rapidité, et ces trois opérations se font à l'aide d'une transmission desmodromique.

Les machines de Corliss et de Sulzer eurent un très grand et très légitime succès, dû en majeure partie sans doute à leur exécution irréprochable. Elles donnèrent dans les applications d'excellents résultats. De là un engouement, exagéré peut-être, pour les distributions à déclenchement. Le principe une fois posé, il n'était pas bien difficile d'en varier les applications; beaucoup d'ingéniosité fut déployée à la recherche de combinaisons nouvelles, produisant des effets analogues. L'Exposition de 1878 fut fertile en productions de ce genre; celle de 1889 n'en comportait pas un moins grand nombre; de superbes machines à déclenchement figuraient dans les galeries, reproduisant les types primitifs ou les variant à l'infini; citons, entre beaucoup d'autres, les expositions du Creusot, de Wheelock, des maisons Sulzer frères, Lecouteux et Garnier, Brasseur, Escher-Wyss et Cie, Dyckhoff, etc.

Peut-être a-t-on été un peu vite et s'est-on laissé trop séduire par ces combinaisons cinématiques si ingénieuses, appuyées d'ailleurs sur une construction de premier ordre. Les distributions à déclenchement procurent des diagrammes d'indicateur à angles nets et vifs, coupés et tracés comme les diagrammes théoriques que l'on voit dessinés dans les ouvrages d'enseignement; est-il bien démontré que la vapeur soit pour cela beaucoup mieux employée? Le déclenchement, il importe de le rappeler, ne s'applique qu'à la fermeture de l'admission; c'est lui qui donne, sur le diagramme, une précision exceptionnelle à l'intersection de la ligne d'admission avec la courbe de détente; les autres distributions fournissent, en ce point, une intersection molle, souvent remplacée par une courbe dénotant un étranglement plus ou moins prolongé. Est-ce là un inconvénient bien sérieux? Est-il prouvé, par cet émoussement d'un angle, que la vapeur soit mal utilisée? Cela n'est pas du tout certain. Ce qui est moins certain encore, c'est que le petit bénéfice qu'on espère obtenir du déclenchement compense la complication très notable qu'il entraîne dans le mécanisme.

Il faut mentionner en faveur du déclenchement les facilités très grandes qu'il procure pour gouverner la détente variable par le régulateur, et la sûreté parfaite qu'il donne à cette commande.

D'autre part, le déclenchement ne saurait s'appliquer aux allures rapides; dès que l'on atteint certaines vitesses, la fermeture par un ressort devient trop lente, et la commande desmodromique reste seule de mise.

Nous passerons rapidement sur les autres modes de transmission de mouvement aux organes de distribution.

Soit un obturateur quelconque, un tiroir en coquille par exemple, conduit par un

excentrique circulaire; imaginons qu'au lieu d'être fixé sur sa tige, le tiroir soit librement traversé par elle, cette tige portant, de part et d'autre, des butoirs, qui viennent successivement en contact avec les faces du tiroir; la tige prendra un mouvement sinusoïdal, mais le mouvement du tiroir sera tout différent : il suivra la tige tant que l'une de ses faces se trouvera poussée par un butoir, et s'arrêtera dès que, la tige revenant en arrière, ce contact cessera; ainsi donc, l'oscillation du tiroir se composera de deux arrêts aux extrémités de la course, et, dans l'intervalle, du mouvement correspondant à un arc plus ou moins étendu de sinusoïde. Une transmission de cette nature peut s'appeler *par contact* ou *à repos*. Les périodes d'immobilité, qui ont lieu aux extrémités de la course, sont fort avantageuses pour certaines distributions. Il va de soi qu'en application le principe peut être mis sous bien des formes : les contacts momentanés sont établis entre deux organes quelconques de la transmission; le mouvement est pris sur un excentrique, sur la manivelle, la bielle ou la tige du piston; le distributeur est glissant ou levant, simple ou complexe, etc. Dans l'ancienne distribution Farcot, si célèbre et si répandue, le mouvement est donné aux tuiles de détente par une transmission à repos; dans les machines de Sulzer, les distributeurs d'échappement, qui sont des soupapes à deux sièges, sont mus de la même manière. C'est aussi le mode de commande employé dans un grand nombre de pompes à vapeur sans arbre tournant, pompe alimentaire Belleville, pompes de compression Westinghouse, etc.; dans ces pompes, tous les organes agissants, le piston à vapeur, le piston de pompe et leur tige commune sont solidaires et ont un mouvement de translation commun; si le mouvement était pris sur l'une de ces pièces et transmis au tiroir par une commande desmodromique, le distributeur aurait à chaque instant une vitesse proportionnelle à celle du piston; il s'arrêterait en même temps que lui aux points morts, et par conséquent la distribution ne pourrait se faire; la commande à repos, avec ses longs arrêts, convient bien à ce genre de machines.

Elle n'est guère applicable, au contraire, au cas des machines rapides, à cause des chocs destructeurs qui se produisent au moment où les contacts s'établissent, et du lancé des pièces, qui, animées de grandes vitesses, dépasseraient la position correspondant à la fin du contact.

Les cames, excentriques triangulaires, excentriques à ondes et, en général, les profils découpés étaient fort usités autrefois pour donner le mouvement aux tiroirs; quoique ces modes de commande soient loin d'être abandonnés, on les emploie moins aujourd'hui pour les machines à vapeur; ils sont, au contraire, fort en usage pour la distribution des machines à gaz. Il est inutile de faire remarquer qu'ils ne s'accommodent nullement des allures rapides.

D'autres dispositions ont encore été appliquées; en voici une, entre autres, qui a été proposée plus d'une fois : le tiroir de distribution principal est relié à un petit piston se mouvant dans un cylindre, dans lequel la distribution est opérée par une transmis-

sion actionnée par la machine; il est facile de voir que, dans ces conditions, le petit piston et le tiroir marquent des temps d'arrêt aux extrémités de leur excursion commune, et franchissent rapidement les positions intermédiaires. Le système était appliqué, à l'Exposition, sur quelques machines à rotation; mais il est bien à sa place lorsqu'il s'agit de machines sans arbre de couche, telles que les pompes à vapeur à action directe.

Nous arrêterons ici la nomenclature des transmissions usitées pour assurer la distribution des machines à vapeur; cette nomenclature est loin d'être complète, mais les autres modes de commande ne se présentaient, à l'Exposition, qu'à l'état de spécimens isolés, et nous les retrouverons au cours de l'étude des machines auxquelles ils s'appliquaient.

Résumons en peu de mots l'étude que nous venons de faire des divers modes de transmission.

On peut tout d'abord les diviser en deux grandes classes : les transmissions desmodromiques et les transmissions non desmodromiques.

Les transmissions desmodromiques sont les seules qui conviennent pour les machines rapides; sous leur forme ordinaire, elles se prêtent mal aux grandes détentes; toutefois on peut les y adapter, soit par le système de Walschaërts, soit par l'interposition d'un équipage de leviers à rapport variable de vitesses, système proposé par Corliss; cette adaptation devient surtout facile lorsque l'admission et l'échappement sont réglés par des distributeurs indépendants; enfin, avec deux distributions superposées, commandées par une transmission desmodromique, on peut obtenir tous les degrés de détente.

Les transmissions non desmodromiques ne conviennent pas pour les grandes vitesses.

La plus importante de ces transmissions, au point de vue des applications qui en ont été faites, est la transmission par déclenchement; le déclenchement n'est employé que pour la fermeture de l'admission; il permet de grandes détentes et se prête bien à la commande de la détente variable par le régulateur.

La transmission à repos a donné lieu également à d'importantes applications. Les autres genres de transmission non desmodromique sont moins en usage, et, en général, réservés pour des cas spéciaux.

Nous avons parlé précédemment des distributions complexes, composées de deux distributeurs successifs, tantôt directement superposés, tantôt séparés l'un de l'autre. En ce qui concerne la commande de ces distributeurs, elle peut être établie suivant l'un quelconque des systèmes que nous avons énumérés; pour cette application spéciale, qui permet dans tous les cas d'obtenir des détentes prolongées, les transmissions les plus simples sont en général les meilleures; on a recours le plus souvent à une transmission desmodromique, avec prise de mouvement sur l'arbre de couche; ou

C. F. E

bien, pour les machines à allures modérées, le distributeur de détente prend son mouvement, à l'aide d'une commande à repos, sur le tiroir de distribution naturelle, lequel est conduit par une commande desmodromique.

Dans la plupart des ateliers, les résistances que le moteur doit surmonter sont incessamment variables; elles varient, non seulement avec le nombre des outils mis en route, mais encore avec la période de fonctionnement dans laquelle se trouve chacun de ces outils. Or, pour que l'allure reste régulière, il est indispensable que la puissance développée par le moteur suive pas à pas les variations de la résistance. Dans la pratique, on peut, il est vrai, tolérer quelques écarts de vitesse, mais resserrés dans des limites étroites; à cet égard, certaines industries sont limitées beaucoup plus strictement que d'autres; ainsi la régularité de marche n'a pas besoin d'être aussi grande dans un atelier d'ajustage que dans une filature; les usines productrices d'électricité sont très sensibles aux moindres variations de vitesse.

Pour maintenir la régularité de l'allure, on agit sur la puissance du moteur, en l'augmentant ou en la diminuant, à la demande des variations du travail résistant. Cela se fait par deux procédés : tantôt on pratique sur la conduite de vapeur un étranglement, que l'on serre plus ou moins, de manière à réduire en proportion la pression dans la boîte à vapeur; d'autres fois, on fait varier le degré de la détente, en laissant la vapeur arriver avec toute sa pression. Les deux procédés se partagent les préférences des ingénieurs. Pendant longtemps, on a regardé comme démontré que la variation de la détente est seule compatible avec un emploi économique de la vapeur; et puis, des doutes sont venus, et, en regardant la question de plus près, on a cru reconnaître que, dans beaucoup de cas, les inconvénients des laminages de vapeur à l'admission sont loin d'être aussi graves qu'on se l'était imaginé. Comme les organes à l'aide desquels on étrangle la vapeur sont fort simples et très faciles à manœuvrer et à commander par le régulateur, beaucoup de constructeurs leur donnent la préférence.

La question reste pendante, comme beaucoup d'autres relatives au bon emploi de la vapeur.

Quoi qu'il en soit, l'étranglement s'obtient au moyen d'obturateurs disposés sur l'arrivée de vapeur; ces obturateurs sont équilibrés, et, comme ils n'ont pas besoin de donner une fermeture étanche, on leur laisse du jeu, ce qui en rend la manœuvre très facile.

En ce qui concerne la détente variable, elle a donné lieu à des inventions extrêmement nombreuses, et c'est encore aujourd'hui un de ces sujets sur lesquels les constructeurs aiment à s'exercer.

Dans une machine une fois construite, les lumières et distributeurs sont peu susceptibles d'être modifiés; c'est donc le plus souvent sur la transmission que l'on agit pour changer le degré de détente; toutefois, dans les distributions complexes, on a pu quel-

quefois obtenir la variation de l'admission par un simple déplacement du distributeur de détente par rapport aux organes de la distribution naturelle.

Dans certains cas, pour changer le degré de détente, on a la possibilité d'arrêter la machine et d'agir sur les organes au repos; le problème est alors des plus faciles. Mais il en est tout autrement dans les cas, de beaucoup les plus fréquents, où la détente doit être modifiée pendant la marche de la machine; le déplacement d'organes lourds, fortement chargés et animés de grandes vitesses, exige des dispositions mécaniques spéciales; et même, si la machine est un peu puissante, la main du mécanicien manque de la force nécessaire; c'est alors qu'on a souvent recours, pour changer la distribution, à des machines à vapeur auxiliaires.

La question devient particulièrement difficile lorsque le changement doit être opéré automatiquement sous l'action du régulateur. La puissance d'un régulateur est toujours petite; des résistances même peu considérables suffisent pour en troubler ou en paralyser le jeu; or, entre les divers organes de la transmission, lorsqu'ils sont en mouvement, les réactions sont, en général, beaucoup trop fortes, et, par suite, les frottements trop intenses pour que le régulateur puisse les maîtriser.

Avec les transmissions non desmodromiques, il se produit, dans le mouvement de certains organes, des temps d'arrêt pendant lesquels le contact avec les organes voisins est supprimé; le régulateur peut agir pendant ces intervalles, et prendre sa position d'équilibre, en déplaçant librement les pièces qui doivent modifier la détente. Les transmissions par déclenchement, en particulier, sont bien appropriées à ce mode d'action : le butoir, qui, en agissant sur la clenche, détermine le départ du déclic, n'est en contact avec cette clenche que pendant un temps fort court; au contraire, pendant la plus grande partie de la révolution de la machine, il reste libre de tout contact, et se déplace sans résistance sous l'action du régulateur. Les transmissions à repos jouissent de propriétés analogues, quoique à un moindre degré peut-être. Les transmissions desmodromiques se prêtent beaucoup moins bien à la commande par le régulateur; néanmoins on est parvenu, dans quelques applications récentes, à leur donner la propriété en question; à cet effet, par l'un des artifices précédemment indiqués, on rend les distributeurs aussi mobiles que possible; de plus, on profite du temps d'arrêt très court qui se produit aux points morts, à l'instant où les contacts changent de sens et laissent ainsi une liberté relative aux pièces mobiles; la transmission ainsi disposée est mise sous la dépendance d'un régulateur puissant, qu'il est facile d'agencer dans les machines à grande vitesse.

Les distributeurs superposés sont fort commodes pour faire varier la détente; il suffit d'une assez faible modification dans la commande des organes pour réaliser de larges variations dans le degré d'admission. Le système était resté de beaucoup le plus en usage, jusqu'au moment où les machines à déclenchement ont fait leur apparition; aujourd'hui encore, d'excellentes maisons de construction lui donnent la préférence.

Il existe trois types classiques de ce genre de distribution, connus sous le nom de distribution *Farcot,* distribution *Meyer* et distribution par *obturation de l'arrivée de vapeur.*

Dans ce dernier mode de distribution, l'obturateur de détente est placé en avant de la boîte à vapeur, de sorte que l'expansion se produit à la fois dans cette boîte et dans le cylindre. Ce mode de fonctionnement n'est sans doute pas très favorable à l'emploi économique de la vapeur; toutefois l'inconvénient est moins grave qu'on ne l'a cru quelquefois; d'autre part, les organes de détente sont légers et faciles à commander. Cette commande se fait souvent, dans les machines fixes, par profils découpés, sous l'action du régulateur; d'autres fois, notamment dans certaines machines marines, la commande est desmodromique et la détente variable est manœuvrée à la main.

La distribution *Farcot,* fort ancienne et très répandue, comporte des tuiles de détente, superposées à un tiroir en coquille, qui les entraîne dans son mouvement; des butoirs convenablement placés arrêtent ces tuiles et déterminent successivement l'ouverture ou la fermeture de l'admission; c'est donc une transmission à repos. Le butoir qui produit la fermeture peut se déplacer sous l'action du régulateur, ce qui fait varier la détente. De beaux spécimens de la distribution Farcot figuraient dans les galeries de l'Exposition.

Dans la distribution *Meyer,* les tuiles de détente sont actionnées par une transmission desmodromique; il suffit d'un faible déplacement de ces tuiles sur leur tige pour modifier la détente dans des proportions étendues; le déplacement s'obtient à la main. Cette distribution se prête bien aux grandes vitesses; elle a donné naissance à un grand nombre de dérivés, dont les auteurs se sont efforcés de mettre le système sous l'action du régulateur.

Dans les machines à multiple expansion, le problème de la variation de la puissance motrice devient fort compliqué. Si l'action modératrice ne s'exerce que sur le cylindre d'admission, il faut que la machine exécute plusieurs révolutions avant que cette action se fasse sentir dans les cylindres de détente; de là des écarts de régime qui peuvent devenir fort gênants. En pareille circonstance, le rôle du volant prend une grande importance. Les machines rapides sont moins sensibles à ce genre d'inconvénient, car le volant, par le fait de sa vitesse, y acquiert une grande puissance.

Il est souvent nécessaire que la machine puisse à volonté marcher en avant ou en arrière. Le changement de marche s'obtient par divers procédés.

Il y en a un, fort simple comme conception, et auquel on revient encore de temps à autre : il consiste à intervertir les communications de vapeur, de telle sorte que la conduite d'amenée devienne conduite d'échappement et réciproquement; un robinet ou un tiroir convenablement installés suffisent pour permettre cette manœuvre. Le système n'est évidemment applicable que dans les cas où l'admission a lieu pendant toute la course

du piston ou à peu près; car, par l'interversion, la détente se transforme en compression; avec une machine à longue détente, le changement de marche aurait pour effet de produire des compressions exagérées et inacceptables. C'est dire que ce système ne saurait s'appliquer qu'à des cas tout à fait spéciaux.

C'est presque toujours sur la commande des distributeurs que l'on agit pour obtenir le changement de marche. Si le mouvement est pris sur l'arbre de couche à l'aide d'un excentrique, il suffit de modifier le calage, de telle sorte que, dans la marche en arrière, l'excentrique occupe, par rapport à la manivelle, une position symétrique de celle correspondant à la marche en avant.

Dans les anciennes machines à marche lente, ce décalage s'obtenait par un moyen assez simple : l'excentrique, fou sur l'arbre, était entraîné par un simple toc fixé sur le même arbre; un autre toc commandait la marche en arrière; la mise en train se faisait en agissant à la main sur le distributeur, de manière à commencer le mouvement dans un sens ou dans l'autre; une fois en prise l'un ou l'autre des deux tocs, le mouvement se continuait de lui-même. Cette manœuvre s'exécutait, la machine étant mise au préalable à l'arrêt; le système ne permettait pas la marche à contre-vapeur, qui aurait détaché le toc de son butoir.

Quelques constructeurs ont adopté un autre dispositif : l'excentrique est percé d'une rainure dans laquelle joue un coulisseau solidaire de l'arbre; en déplaçant l'excentrique sur son coulisseau, on change la position du centre d'excentricité par rapport à l'axe de l'arbre. L'étude géométrique du système permet de reconnaître que ce changement dans la longueur et la position du rayon d'excentricité a pour résultat de modifier les conditions de la distribution, et permet, non seulement de renverser la marche, mais aussi d'augmenter ou de restreindre le degré de détente entre des limites plus ou moins étendues. La manœuvre, d'ordinaire, se fait au repos, et l'excentrique est fixé sur son coulisseau par des boulons serrés à bloc. Néanmoins, à l'aide d'artifices convenables, il est possible d'opérer sans arrêter; et même, dans certaines machines à grande vitesse, l'excentrique est commandé par un régulateur puissant, qui en modifie la position sur l'axe et fait varier l'admission à la demande du travail résistant.

Le système de changement de marche le plus en usage aujourd'hui est la coulisse de Stephenson ou l'un des nombreux appareils qui en sont dérivés. Deux excentriques calés sur l'arbre sont affectés, l'un à la marche en avant, l'autre à la marche en arrière; les deux bielles d'excentrique sont réunies à leurs extrémités par une coulisse, dans laquelle circule un coulisseau qui commande le distributeur; suivant que le coulisseau est mis en prise avec l'une ou l'autre des extrémités de la coulisse, la marche a lieu dans un sens ou dans l'autre. La plupart des locomotives et des machines marines sont pourvues de changement de marche à coulisse et à deux excentriques. Cet appareil présente en outre une propriété intéressante : si le coulisseau est en prise, non plus

avec l'extrémité de la coulisse, mais avec un point intermédiaire, les conditions de la distribution sont changées, et la période de détente est d'autant plus prononcée, que le point d'attache du coulisseau se rapproche davantage du point milieu de la coulisse; géométriquement parlant, le fonctionnement de la coulisse de Stephenson donne, à peu de chose près, les mêmes résultats que l'excentrique à rainure dont nous avons parlé plus haut; les deux appareils permettent le changement de marche et la variation de la détente; mais aussi, avec l'un comme avec l'autre, les détentes prolongées sont accompagnées d'avances et de compressions fort étendues.

Les commandes desmodromiques dans lesquelles le mouvement est pris sur la bielle ou la manivelle se prêtent également au renversement de la marche; il suffit, pour cela, d'interposer sur la transmission une coulisse oscillant autour de son point milieu; suivant que le distributeur est actionné par l'un ou l'autre des bras de cette coulisse, ses mouvements se trouvent intervertis; il en sera de même de la distribution. Ce dispositif et d'autres plus ou moins analogues sont appliqués avec succès dans les machines marines et les locomotives. La transmission Walschaërts se prête également à des arrangements de cette nature.

Aussi bien que les commandes desmodromiques, les commandes à repos, à déclenchement et autres peuvent être transformées en vue du changement de marche.

Dans les machines à multiple expansion, l'application du changement de marche ne comporte pas de difficulté particulière; il est utile de remarquer que la marche doit être renversée à la fois dans tous les cylindres, ce qui entraîne des sujétions dans la construction et la manœuvre de la commande; ces sujétions sont fréquemment écartées, dans les grandes machines, par l'emploi de cylindres à vapeur spéciaux commandant les arbres de changement de marche.

Depuis quelques années, un grand nombre de constructeurs ont étudié l'application de la détente par échelons aux locomotives des chemins de fer. Il y a, dans le service de ces machines, une condition tout à fait caractéristique et spéciale : c'est la grande variabilité de l'effort à exercer; si l'on considère comme normal l'effort de traction à développer sur un parcours de niveau, cet effort est fortement diminué dans la descente des pentes; et si la pente est un peu forte, l'effort devient nul ou même négatif; au contraire, dans le parcours des rampes, l'effort de traction s'augmente dans des proportions considérables; à ce point de vue, la locomotive doit posséder une élasticité très grande de puissance. Cette élasticité, on peut la donner aux machines à expansion multiple, à l'aide d'un procédé intéressant : entre l'échappement du cylindre admetteur et l'admission du cylindre de détente, on intercale un distributeur manœuvrable à la main et susceptible de prendre deux positions : lorsqu'il est dans sa position normale, il laisse la vapeur se rendre directement de l'échappement du petit cylindre à la boîte à tiroir du grand cylindre; mais, placé dans la seconde position, il fait commu-

niquer, d'une part, l'échappement du petit cylindre avec l'atmosphère, de l'autre, la vapeur venant de la chaudière avec la boîte de distribution du cylindre détendeur; dans cette situation, les deux cylindres travaillent isolément sous la pression effective totale qui règne dans la chaudière, et la puissance de la machine se trouve augmentée dans de très fortes proportions. La fatigue imposée aux organes par ce fonctionnement anormal peut être, dans certains cas, excessive; on l'atténue à l'aide de quelques artifices faciles à imaginer.

La plupart des machines à vapeur employées dans l'industrie comportent, ainsi qu'on l'a vu plus haut, un piston parcourant un cylindre sous l'action de la vapeur et un arbre tournant relié au piston par une transmission mécanique. Elles sont en général à double effet, c'est-à-dire que la pression agit successivement sur chacune des faces du piston. Les machines auxquelles manque l'un ou l'autre de ces deux organes essentiels, piston à double effet et arbre de couche, peuvent être considérées comme des exceptions; néanmoins leur étude présente de l'intérêt, et, dans des cas particuliers, tel type, s'écartant des données ordinaires, peut rendre de véritables services.

Comme application du simple effet, il convient de mentionner certaines machines à très grande vitesse de rotation : la pression, toujours appliquée sur la même face du piston, maintient constamment en charge les organes de la transmission, et supprime ainsi les chocs qui tendent à se produire à fin de course, au moment où les organes passent de l'état de tension à l'état de compression.

Les anciennes pompes à vapeur ne comportaient pas d'arbre de couche; l'action se transmettait du piston à vapeur au piston à eau par une simple tige ou par un balancier, sans intermédiaire d'aucun organe rotatif. Ce dispositif, qui date des premiers âges de la machine à vapeur, et a pris dans certains pays une très grande extension, avait perdu peu à peu la faveur dont il jouissait; on lui préférait, pour divers motifs, les machines à rotation. Les choses semblent changées aujourd'hui : dans ces dernières années, les pompes à vapeur sans arbre de couche ont reçu d'importantes applications; grâce à une analyse plus complète des conditions du problème, on a pu les employer avec succès pour l'alimentation des chaudières à vapeur et pour les élévations d'eau à faible débit; dans un autre ordre d'idées, on les a établies sur de vastes échelles, pour élever de grands volumes d'eau, en les munissant d'accessoires ingénieux, qui permettent de travailler à détente, malgré l'absence du volant ou de toute masse importante en mouvement. Dans les machines sans arbre tournant, la commande des distributeurs ne saurait être desmodromique; les commandes à repos ou par pression de vapeur s'y appliquent avec succès; pour les grandes puissances, la détente peut avec avantage se faire dans plusieurs cylindres.

Comme exemple remarquable de distributions spéciales, on peut citer le *servomoteur,* cet appareil merveilleux qui met dans le bras d'un homme la force d'un piston

sous pression, et assouplit de telle sorte ce puissant appareil, qu'il suit servilement tous les mouvements de la main qui le conduit. Le principe du servo-moteur reçoit tous les jours les applications les plus variées.

Dans d'autres machines, le mouvement rectiligne alternatif du piston est remplacé par un mouvement de rotation continue. On voyait peu de machines rotatives à l'Exposition : le système est presque abandonné aujourd'hui, à la suite des mécomptes auxquels il a conduit les innombrables inventeurs qui ont dépensé tant d'ingéniosité sans pouvoir résoudre le problème.

Par contre, l'Exposition a mis en relief un nouvel appareil qui a enfin réussi, après avoir fait l'objet de nombreuses tentatives, toujours couronnées d'insuccès; nous voulons parler de la *turbine à vapeur,* dans laquelle le fluide élastique agit, non plus par sa pression statique, mais par sa vitesse; c'est la première fois que la turbine à vapeur a reçu une forme qui lui permît de travailler pratiquement et utilement. Ici, il n'existe plus, à proprement parler, de distribution; les orifices offerts au passage de la vapeur restent entièrement ouverts pendant toute la durée de la marche de la machine.

Comme cas particulier des pompes à vapeur, il faut citer le *pulsomètre,* dans lequel l'organe solide sur lequel s'exerce la pression (le piston) a disparu, la vapeur pressant directement sur le liquide à élever; la distribution se réduit à un simple clapet, qui se déplace automatiquement par l'effet des variations de la pression qui règne dans l'appareil.

Enfin, au dernier degré de la simplicité, on rencontre les *injecteurs,* pompes à vapeur qui ne comportent aucun organe mobile : dans un injecteur, toutes les pièces solides sont fixes; c'est le mouvement seul des fluides qui constitue le jeu de l'appareil.

Nous nous sommes efforcé, dans ce qui précède, de résumer l'état actuel des connaissances et les pratiques modernes en ce qui concerne les machines à vapeur. Ces considérations générales nous permettront d'abréger beaucoup la description des machines qui figuraient à l'Exposition. Cette description se divisera en trois sections, qui auront pour objet :

Les machines fixes;

Les machines locomobiles, mi-fixes et diverses;

Et enfin les régulateurs de vitesse.

SECTION II.

MACHINES FIXES.

SOMMAIRE.

Objet et division.

Machines monocylindriques à vitesse modérée.

Petites machines fixes.

Distribution système Farcot et dérivés. — Machine de Buffaud et Robatel. — Distribution de Pantin. — Machine du Phoenix.

Détente par obturation de l'arrivée de vapeur. — Machine de Gilly.

Machines à balancier. — Machine de Casse.

Distribution système Meyer et dérivés. — Machines de Davey, Paxman et Cie, de Boulet. — Distribution Rider. — Machines d'Escher, Wyss et Cie, de Merlin. — Distribution de Finck, de Damey, de Bonjour.

Distribution de Joy.

Machines monocylindriques à grande vitesse. — Machines d'Escher, Wyss et Cie, d'Armington et Sims, de la Straight line, de Sautter et Lemonnier, d'OErlikon, de Lecouteux et Garnier.

Machines monocylindriques à distribution par déclenchement.

Machines à quatre distributeurs cylindriques. — Machines de Lecouteux et Garnier, de Brasseur, de Farcot, du Creusot, de Darblay. — Distribution Frikart.

Machines à quatre distributeurs plats. — Machines de Halot, de Brown, de Fives-Lille, de la Société Verviétoise, de Hoyois, de Jean et Peyrusson.

Machines à deux lumières. — Machine de Wheelock; type de 1878, type de 1885; machines de de Quillacq, de Brasseur. — Distribution Stoppani; machine de Dyckhoff. — Distributions par soupapes, type Sulzer : machine de Sulzer, de Carels. Machines de la Société de la Meuse, de Couillet, de Windsor.

Machines à distribution diverses. — Machines de Bonjour (l'Horme et Borssat). — Changements de marche de Roirant, de Daugy. — Machines à distributeurs rotatifs de Biétrix, de Brotherhood.

Machines à expansion multiple. — Historique : Travaux de B. Normand. — Principes de ces machines. — Dispositions principales et classification. — *Machines* Woolf de Windsor, de Douane, Jobin et Cie.

Machines Compound. — Dispositions diverses.

Machines Compound horizontales avec distribution ordinaire du Phoenix, d'Olry, Granddemange et Coulanghon, de Chaligny, de la Société suisse, de la Société alsacienne, de Boulet, de l'Horme (système Bonjour), de Biétrix.

Machines Compound horizontales avec distribution par déclenchement de Berger-André. — Machines à distribution Frikart de la Société alsacienne, d'Escher Wyss. — Machines de Brasseur, systèmes Corliss et Wheelock. — Machines Wheelock de de Quillacq. — Machines à distribution par soupapes de Sulzer, de Carels.

Machines Compound pilon de Weyher et Richemond, de Farcot, de Cail, de Fives-Lille, de Buffaud et Robatel, de Boulet, de Sulzer, d'OErlikon (système Hoffmann), des Forges et Chantiers de la Méditerranée, de Bréguet, de Chaligny, de Sautter et Lemonnier, de Biétrix.

Machines Compound en tandem de Windsor, de de Ville-Châtel (système Frikart), de Biétrix.

Machines à triple expansion de Weyher et Richemond, de Farcot, de Sulzer (pilon et tandem, système Züblin), de Powell, de Rebourg.

Appareils divers. — Condenseurs. — Condenseurs de Weyher et Richemond, de Kirkaldy, de Fouché. — Refroidisseurs d'eau condensée de Chaligny, de Grangé.

Nous allons maintenant aborder l'étude descriptive des machines qui figuraient à l'Exposition. Les préliminaires présentés dans la section précédente nous permettront d'être bref. Il serait d'ailleurs tout à fait superflu de décrire une à une les quelques centaines de machines exposées : il y a un choix à faire. Mais ce choix comporte par lui-même une large dose d'arbitraire; et l'on ne s'étonnera pas si nous sommes conduit à passer sous silence un grand nombre de constructions fort bien entendues d'ailleurs et très recommandables.

Il est indispensable d'observer un certain ordre dans ces études; il faut classer les nombreuses machines à examiner. Il a paru que la distribution de vapeur est l'organisme qui convient le mieux pour servir de base à une pareille classification, celui qui est le plus propre à établir des rapprochements entre les machines analogues, à différencier les machines dissemblables. C'est donc principalement d'après le mode de distribution de vapeur que seront classées les machines que nous avons à décrire.

A ce point de vue, il y a lieu tout d'abord de diviser ces machines en deux groupes : les machines à un seul cylindre et les machines à expansion multiple.

Dans les machines monocylindriques, il convient de faire une famille à part de celles comportant une détente par déclenchement, à cause de l'importance toute spéciale que ce mode de distribution a prise depuis quelques années. Les autres machines fixes non pourvues de ce mode de distribution formeront une autre famille, qui elle-même se divisera en deux branches : la première branche comprendra les machines ordinaires de manufactures, à allures relativement modérées; à la deuxième branche se rattacheront les machines à grande vitesse, dont l'établissement se fait sur des données toutes spéciales.

La détente par échelons comporte deux subdivisions : la distribution Woolf et la distribution Compound.

En ajoutant à cette répartition fondamentale les quelques dispositifs accessoires qui doivent être décrits en même temps que les machines fixes, nous arrivons à la classification ci-après :

Machines monocylindriques à distribution ordinaire et vitesse modérée;
Machines monocylindriques à grande vitesse;
Machines monocylindriques à distribution par déclenchement;
Machines monocylindriques à distributions diverses;
Machines Woolf;
Machines Compound;
Objets divers se rapportant aux machines fixes.

Tel est l'ordre qui sera suivi dans ces études, ordre qui n'a rien d'absolu d'ailleurs, et dont nous pourrons nous écarter plus ou moins suivant les convenances du sujet.

Malgré les transformations radicales que l'industrie a eu à subir, malgré les exigences nouvelles résultant de cette situation, la machine de manufacture se construit encore, dans bien des cas, suivant les anciens errements : l'allure reste modérée; le cylindre horizontal commande directement la manivelle; la distribution est simple et se compose d'un tiroir mû par un excentrique.

L'Exposition présentait un grand nombre de machines établies sur ces données, et dont les puissances variaient dans des limites fort étendues; à côté des grands appareils fournissant des centaines de chevaux, on voyait figurer de modestes moteurs, destinés à actionner les petites usines.

Si intéressantes que puissent être ces petites machines, tant au point de vue de leur

construction qu'à celui des services qu'elles rendent dans l'industrie, nous ne saurions nous arrêter longuement sur leur étude; ce sont des types depuis longtemps arrêtés, même dans les détails, et elles comportent peu de dispositions nouvelles. Le plus souvent, la distribution est constituée par un simple tiroir en coquille, mû par un excentrique fixe; quelquefois l'excentrique est à calage variable; l'uniformité de la marche est assurée par une valve en papillon, actionnée par un régulateur ordinaire. L'échappement se fait d'ordinaire dans l'atmosphère, mais quelquefois on ajoute un condenseur. En somme, ces moteurs sont en tout semblables à ceux que l'on installe sur le dos d'une chaudière, pour constituer les machines locomobiles et mi-fixes. Il est inutile d'insister.

Les grandes machines d'usine, au contraire, présentent des sujets d'étude d'un véritable intérêt. Nous les examinerons avec quelques détails. Nous commencerons par celles dans lesquelles la distribution est obtenue par un tiroir mû par un excentrique et surmonté d'organes de détente avec commande à repos du genre Farcot.

La distribution imaginée par Farcot (Marie-Joseph-Denis), vers 1836, est un des plus anciens dispositifs comportant une commande à repos dominée par le régulateur. Farcot avait, il est vrai, été précédé dans cette voie par Edwards (Henri-Hind), dont le brevet date de 1833; mais Edwards ne put parvenir à rendre son système réellement pratique. Ce ne fut pas d'ailleurs du premier coup que Farcot arriva à faire réussir sa distribution; il lui fallut bien des recherches, des tâtonnements, une étude très approfondie des conditions multiples du problème. Au bout de quelques années, ces difficultés étaient surmontées; grâce à des perfectionnements bien entendus, le nouvel appareil fonctionnait d'une manière irréprochable; il avait acquis sa forme classique et entrait largement dans les usages industriels. On connaît les dispositifs de cette belle distribution : sur le dos d'un tiroir en coquille sont appuyés, par des ressorts, deux obturateurs à jalousie ou *tuiles de détente,* qui accompagnent le tiroir dans son mouvement, jusqu'à ce qu'ils viennent en contact avec des butoirs. C'est ainsi que se produisent successivement l'ouverture et la fermeture de deux lumières percées à travers le tiroir; le butoir qui produit la fermeture est mobile sous l'action du régulateur; ce déplacement fait varier le degré d'admission. Le système ne comporte pas de grandes avances; l'admission ne peut être prolongée au delà du tiers environ de la course du piston; les faibles introductions sont complètement gouvernées par le régulateur. Ainsi constituée, la distribution Farcot s'adapte de la manière la plus satisfaisante aux machines de manufacture, à condensation et à allure modérée. C'est en vue de ces applications qu'elle a été créée, et son succès a été complet.

La maison Buffaud et Robatel, de Lyon, expose une machine munie de cette distribution, et dont les dimensions principales sont les suivantes :

Diamètre du cylindre	350 millim.
Course du piston	700

IMPRIMERIE NATIONALE.

A la vitesse de 75 tours par minute et en marche normale, cette machine développe environ 40 chevaux de puissance.

Les lumières de distribution, très courtes, sont obturées par un tiroir occupant toute la longueur du cylindre; ce tiroir, qui donne la distribution naturelle, supporte des tuiles de détente à jalousie, avec commande à repos, système Farcot; la détente variable est gouvernée par un coin, qui se déplace verticalement sous l'action du régulateur.

Le dessin de cette belle machine est fort soigné : le cylindre, à enveloppe complète, est venu de fonte avec sa chemise; l'échappement se fait en contre-bas du cylindre, de manière à assurer l'écoulement des eaux condensées; la pompe à air et la pompe alimentaire, placées au-dessous de la machine, sont actionnées par un long levier, qui prend son mouvement sur la crosse du piston; le bâti en fonte a reçu une forme élégante et légère. Tous les détails sont fort bien étudiés et la construction est des plus remarquables.

La distribution Farcot a donné naissance à un grand nombre de dérivés; les uns ne comportent que de simples modifications aux formes des organes; c'est le cas de la distribution que nous venons de décrire. D'autres modifications sont plus profondes et s'attaquent aux principes du système; on s'est efforcé, soit de le douer de propriétés nouvelles, soit d'échapper aux inconvénients du type original, tels que la limitation de l'admission et des avances. Ainsi, la Société centrale de construction de machines de Pantin (Seine) a muni quelques-unes de ses machines d'un double système de tiroirs de détente : le premier tiroir est mû par un excentrique, comme dans la distribution Meyer; le deuxième obturateur est une tuile de détente, actionnée par une commande à repos, comme les tuiles Farcot.

Sous une forme un peu plus simple, la Société anonyme du Phœnix, de Gand (Belgique), applique à ses machines une distribution qui emprunte à la fois au système Farcot et au système Meyer leurs principes essentiels. Cette distribution, imaginée par M. Hertay, ingénieur en chef des établissements, était, à l'Exposition, appliquée à une belle machine Compound; néanmoins il paraît opportun de l'étudier à cette place, sauf à revenir plus tard sur la description de la machine exposée.

La figure 87 représente la distribution Hertay. Deux demi-tiroirs *AA* donnent la distribution naturelle. Sur le dos de ces tiroirs se meuvent les tuiles de détente *BB*, montées sur les tiges *aa*; le mouvement est communiqué à ces tiges par la pièce *C*, qui est commandée par un excentrique spécial, calé sur l'arbre de couche. Jusqu'ici le système ne diffère pas en principe de la distribution Meyer; mais les effets deviennent tout autres si l'on introduit entre les organes un jeu suffisant, de manière à transformer la commande desmodromique en commande à repos : à cet effet, les tiges *aa* ne sont pas fixées sur la pièce *C*, mais elles jouent librement dans le cadre *bb* solidaire

de cette pièce; les taquets *dd*, montés sur les bouts des tiges, sont successivement entraînés à droite ou à gauche, lorsqu'ils viennent en contact, soit avec les petits côtés du cadre, soit avec la pièce centrale *D* qui participe à son mouvement. Cette pièce cen-

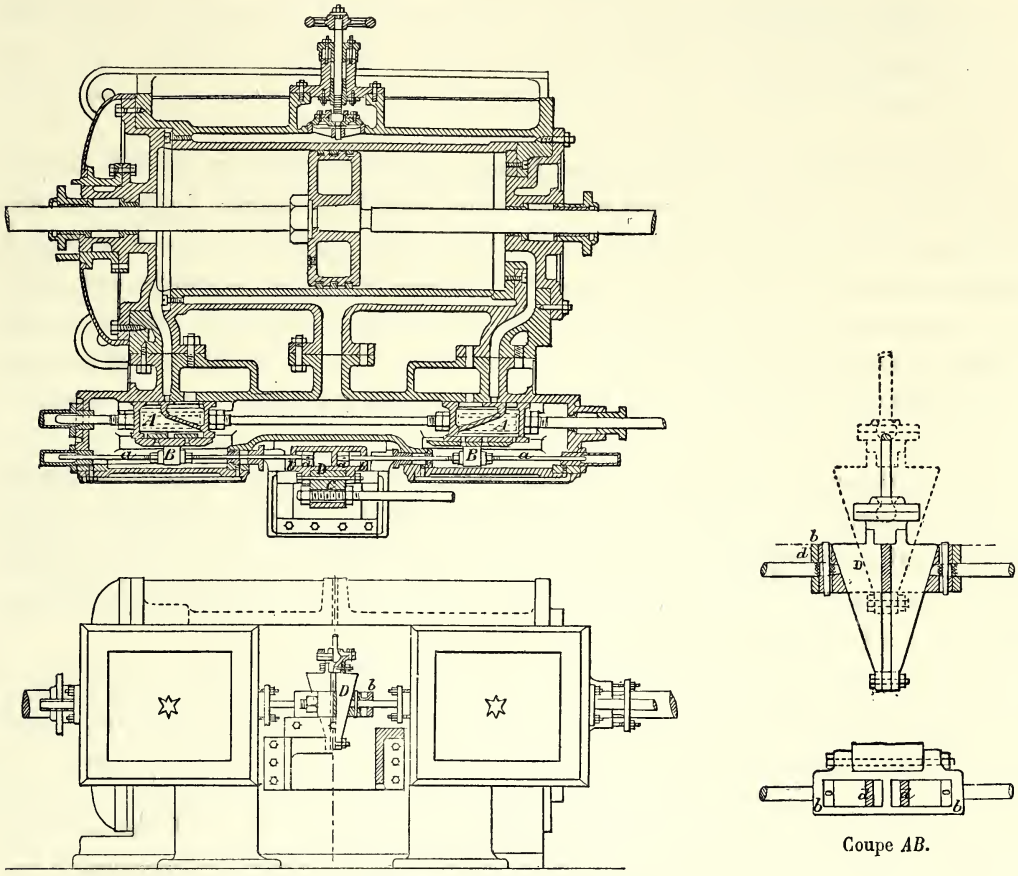


Fig. 87. — Distribution Hertay.

trale a la forme d'un coin et peut se déplacer verticalement sous l'action du régulateur; lorsqu'elle s'élève, le jeu de la transmission s'accroît, et par suite la durée de l'admission se trouve prolongée.

La détente par obturation de l'arrivée de vapeur fut, suivant toute apparence, inventée par Meyer, l'auteur de la distribution par tiroirs superposés avec commande desmodromique. Ce fut en 1833 que Meyer (Jean-Jacques) imagina ce dispositif, comportant, à l'entrée de la boîte de distribution, une soupape, dont la levée avait une durée variable suivant la position du régulateur; la première application fut faite par Meyer dans une filature de la Bohême; le système eut un grand succès et se répandit rapidement dans l'industrie. Nous en trouvons, dans les galeries de l'Exposition, une

nouvelle application, sous une forme un peu différente, dans la machine présentée par la Société anonyme des forges, usines et fonderies de Gilly (Belgique). Cette machine a les dimensions ci-après :

Diamètre du cylindre	500 millim.
Course du piston	800 —
Nombre de tours par minute	75
Puissance normale	75 chev^x.

La distribution est du système Aimé Robert : un simple tiroir en coquille, mû par un excentrique circulaire, assure la distribution naturelle; la boîte à vapeur est fort petite, et l'orifice d'entrée de la vapeur dans cette boîte est fermé par une soupape à double siège; celle-ci est manœuvrée par un système de déclic fort simple, qui prend son mouvement sur la tige du tiroir; le déclenchement, qui amène la retombée de la soupape, se produit plus ou moins vite, suivant la position du régulateur; la soupape est rappelée sur son siège par un ressort, dont l'action est modérée par un dash-pot.

Les machines à balancier sont fort peu nombreuses à l'Exposition. On remarquait, dans les galeries, une machine de ce type construite par M. Casse, de Lille, suivant les dispositions imaginées par M. Fourlinnie; cette machine comporte deux cylindres jumelés actionnant un arbre commun par deux manivelles à angle droit; les dimensions sont les suivantes :

Diamètre des cylindres	630 millim.
Course des pistons	1,360 —
Nombre de tours par minute	52

La vitesse moyenne des pistons est, d'après ces chiffres, de 2 m. 36 par seconde, et dépasse notablement les vitesses ordinairement pratiquées dans les machines à balancier. L'axe central du balancier repose, non pas dans un palier fixe, mais sur la tête d'une bielle verticale oscillant autour de son pied; la tige du piston s'articule directement sur l'extrémité du balancier, et la rectitude du mouvement est assurée par une bielle de rappel, articulée sur un point fixe, disposition analogue à l'ancien parallélogramme d'Oliver Evans. La distribution se fait par quatre tiroirs plans, et le régulateur est à air.

Nous arrivons aux machines de manufacture avec distribution à commande desmodromique. Un grand nombre de ces machines sont munies de la distribution Meyer, laquelle comporte, comme on sait, deux tiroirs superposés, chacun d'eux étant commandé par un excentrique spécial.

Cette distribution, créée en 1841 par J.-J. Meyer, fut imaginée spécialement en vue de rendre plus économique, par l'emploi de la détente, la traction sur les chemins de

fer. Néanmoins, après des essais, assez nombreux du reste, poursuivis en France et en Allemagne, la distribution Meyer a été abandonnée pour les locomotives; il en a été fait, au contraire, de nombreuses applications aux machines marines et surtout aux machines fixes, demi-fixes ou locomobiles. Le système jouit de propriétés précieuses : non seulement il comporte une admission variable dans les plus larges limites, mais encore il permet de donner aux avances et à la compression telles valeurs qui sont jugées les plus avantageuses. Dans le cas de machines à grande vitesse, le tiroir Meyer devient lourd et encombrant; c'est une des raisons qui en ont limité l'emploi sur les locomotives et, dans beaucoup de cas, sur les machines marines. Cet inconvénient est beaucoup moins grave lorsqu'il s'agit de machines fixes; mais le système, tel qu'il était établi dans l'origine, en présente un autre. Dans la distribution Meyer, le degré de détente dépend de trois facteurs, savoir : le rayon d'excentricité de l'excentrique de détente, l'angle de calage de cet organe et la position du tiroir de détente sur sa tige; c'est ce dernier élément que Meyer avait choisi comme variable : le tiroir était divisé en deux moitiés symétriques ou *blocs de détente,* chaque bloc desservant l'une des extrémités du cylindre; les blocs étaient enfilés sur une tige filetée, manœuvrable du dehors; en agissant sur cette tige, on modifiait la distance des blocs et, par suite, l'admission. Malheureusement cette opération ne pouvait se faire qu'à la main; la commande automatique par le régulateur, du moins par les régulateurs ordinaires, n'était pas possible. Nous verrons comment on est parvenu à tourner cette difficulté.

La station centrale d'électricité dite *station Gramme,* établie dans le jardin d'isolement entre le Palais des Machines et le Palais des Industries diverses, comportait plusieurs machines, construites par la maison Davey, Paxman et Cie, de Colchester (Angleterre). L'une de ces machines était monocylindrique; ses dimensions principales étaient :

Diamètre du cylindre	521 millim.
Course du piston	813 —
Nombre de tours par minute	65
Puissance normale	100 chev^x^.

La distribution, du système Paxman, est obtenue par deux tiroirs superposés, avec commande desmodromique; le tiroir de distribution naturelle (fig. 88) est actionné par un simple excentrique; le mouvement du tiroir de détente est pris sur une coulisse commandée par deux excentriques; le degré d'admission résulte de la position de cette coulisse, qui est suspendue à la douille du régulateur. Ainsi qu'on l'a vu précédemment, ce mode de commande laisse au régulateur sa liberté pendant le temps très court qui avoisine le moment où le distributeur passe au point mort; un artifice analogue avait déjà été mis en usage sur une machine présentée, à l'Exposition universelle de 1878, par la maison Duvergier, de Lyon.

La maison J. Boulet et Cie, de Paris, expose plusieurs machines, fixes, mi-fixes ou

locomobiles, dans lesquelles la distribution est assurée par deux tiroirs superposés avec commande desmodromique.

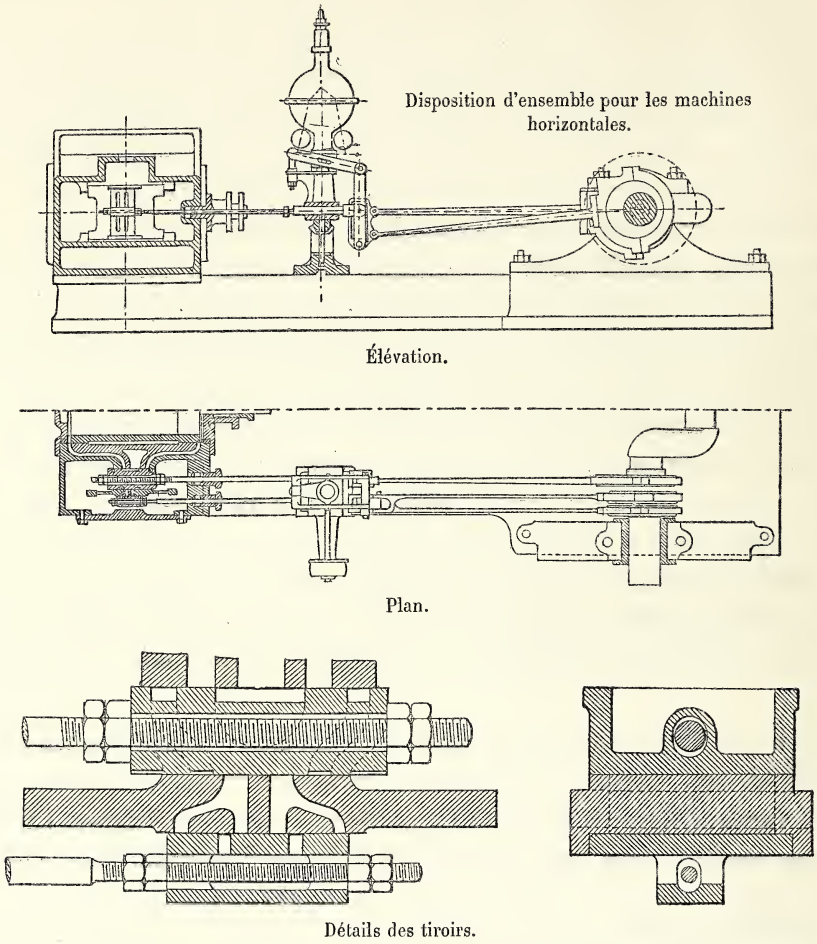


Fig. 88. — Détente automatique par le régulateur système Paxman.

Une des variétés intéressantes de la distribution Meyer est le système de détente imaginé par Rider : la glace qui surmonte le tiroir de distribution naturelle n'est pas plane, mais creuse et cylindrique, à base circulaire; les lumières s'y ouvrent en biais, figurant deux arcs d'hélice, qui divergent en forme de V. Sur cette glace repose un bloc de détente, qui s'y applique par une face convexe et cylindrique; ce bloc est mû par un excentrique spécial, qui lui imprime un mouvement de va-et-vient parallèle aux arêtes du cylindre de contact; ses tranches, taillées également en biais, sont parallèles aux lumières en V. Les choses étant ainsi disposées, on voit qu'il suffit de faire tourner le bloc autour de son axe pour faire varier le découvrement et, par conséquent, pour modifier l'admission. Cette rotation peut être commandée par le régulateur, mais ici les déplacements du régulateur sont grandement facilités par cette circonstance,

que la vitesse angulaire du bloc est très petite par rapport à sa vitesse de translation, de sorte que le frottement est dirigé à fort peu près suivant les arêtes du cylindre, et que sa composante circonférentielle est négligeable.

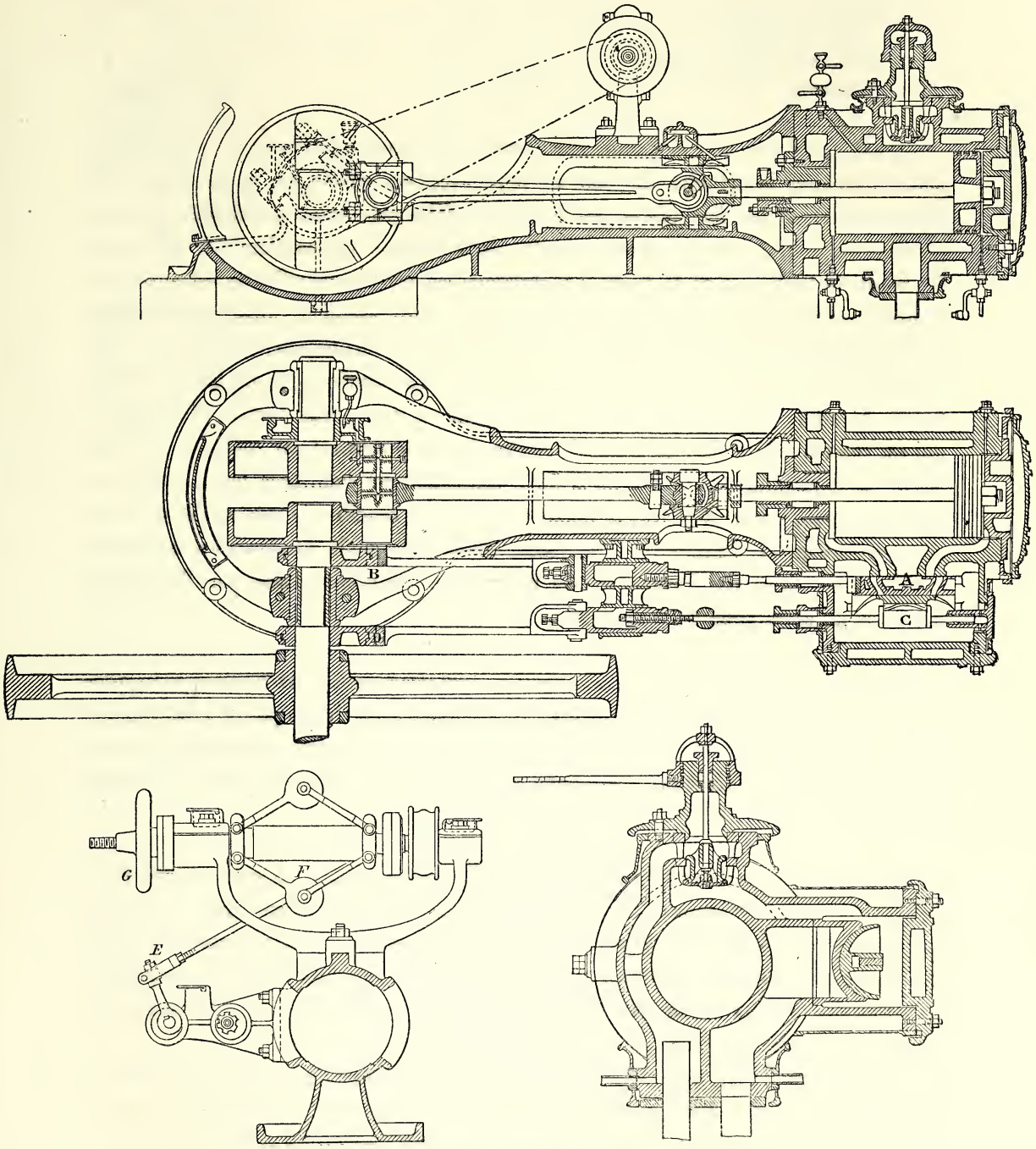


Fig. 89. — Machine Escher, Wyss et Cie. — Distribution Rider.

Comme exemple d'application de la distribution Rider, nous citerons une machine qui figurait dans la magnifique exposition de la maison Escher, Wyss et Cie, de Zurich. Cette machine, représentée fig. 89, a les dimensions suivantes :

Diamètre du cylindre	275 millim.
Course du piston	400 —
Nombre de tours par minute	150
Puissance	40 à 50 chevx.

Le bâti, de forme très élégante, porte sur la maçonnerie de fondation par un large patin circulaire; le cylindre est venu de fonte avec son enveloppe et son couvercle; l'arbre coudé est en cinq pièces, les joues du vilebrequin étant constituées par deux plateaux en fonte, portant des contrepoids, dans lesquels s'assemblent par forcement les bouts de l'arbre et de la fusée. Le graissage est très soigné; l'huile est envoyée à la grosse tête de bielle par la force centrifuge, et aux glissières ainsi qu'à la petite tête de bielle par un lécheur. On voit en *A* le tiroir de distribution, actionné par l'excentrique *B*, et en *C* le bloc de détente, mû par l'excentrique *D*; ce bloc, taillé en forme de coin, peut tourner autour de l'axe de sa tige, sous l'action du levier *E* qui est commandé par le régulateur *F*, recevant son mouvement par courroie. Ce régulateur est horizontal, et l'action de la force centrifuge est équilibrée par un ressort à boudin enroulé autour de l'axe; le volant *G* permet de modifier la tension de ce ressort et, par conséquent, l'allure de la machine. Toute cette belle construction est remarquable, aussi bien par l'aspect et les dispositions d'ensemble que par l'étude des détails et les soins apportés à l'exécution.

MM. Merlin et Cie, constructeurs à Vierzon, font usage d'une distribution se rapprochant beaucoup du type Rider; le tiroir de détente est cylindrique et peut tourner autour de son axe; il est percé de lumières obliques; le système est appliqué sur un tiroir simple ou bien fonctionne dans une chambre spéciale, par obturation de l'arrivée de vapeur.

Parmi les nombreuses variétés de la distribution Meyer, il en est une qui a fait l'objet de beaucoup d'inventions; on s'est ingénié à supprimer l'excentrique de détente : on peut obtenir ce résultat en prenant le mouvement du tiroir de détente, soit sur la tige du piston, soit sur la bielle ou la manivelle, soit même sur l'excentrique de distribution; ce dernier mode est le plus en usage, et les machines de l'Exposition en offraient plusieurs spécimens.

Avec la transmission ordinaire par une simple bielle entre l'excentrique et la tige du distributeur, le mouvement que prend le tiroir est représenté, en fonction du temps, par une courbe sensiblement sinusoïdale; mais on peut, par divers artifices, modifier la loi de ce mouvement. L'un des moyens employés consiste à imprimer au collier d'excen-

trique un mouvement oscillatoire autour de son centre, à l'aide d'un lien excentré; la bielle du tiroir s'articule, soit sur le collier, soit sur une pièce fixée au collier. Le principe a été appliqué, il y a longtemps, par un ingénieur éminent, Pius Finck, à un système de distribution qui permettait, non seulement la variation de la détente, mais aussi le changement de marche à l'aide d'un seul tiroir et d'un seul excentrique.

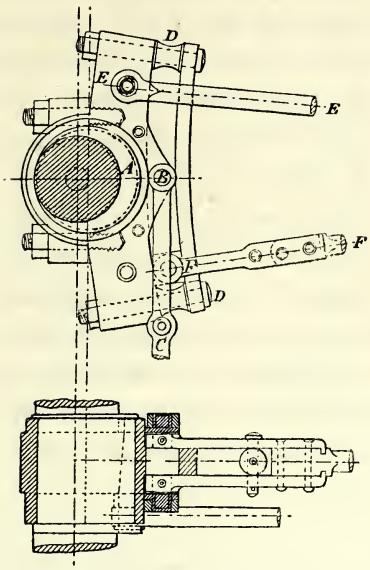


Fig. 90. — Distribution Meyer. Dispositif Damey.

M. Damey, constructeur à Dôle, présente un spécimen intéressant de ce dispositif (fig. 90). Sur le collier d'excentrique *A* s'articule le lien *BC* oscillant autour du point *C*; sur ce collier est fixée la coulisse *DD*; la tige *EE* du tiroir de distribution s'attache en un point fixe de la coulisse; la tige *FF* du tiroir de détente prend son mouvement sur un coulisseau, qui peut se fixer en un point quelconque de la coulisse, ce qui produit la variation de l'admission dans des limites fort étendues.

La Compagnie des fonderies et forges de l'Horme (Loire) expose une machine remarquable, munie d'une distribution fondée sur des principes analogues et imaginée par M. C. Bonjour. Ici les variations de la détente s'obtiennent par le déplacement du centre d'oscillation du lien articulé. Sur le collier d'excentrique (fig. 91) viennent s'attacher, d'une part, la bielle *A* du tiroir de distribution et, d'autre part, la bielle *B* du tiroir de détente. Le lien *CD* s'articule en *C* sur le même collier et oscille autour du point *D*; cet axe d'oscillation peut lui-même se déplacer puisqu'il est suspendu à l'extrémité du levier *FED*, qui tourne autour du point fixe *E* en prenant successivement les positions comprises entre *FED* et *F'ED'*; la première de ces positions correspond à l'admission maximum d'environ 45 p. 100, et la seconde à une admission nulle. L'extrémité *F* du levier est suspendue à la douille du régulateur.

Par d'heureuses combinaisons entre les proportions des divers éléments de cette commande, M. Bonjour est parvenu à des résultats remarquables; à l'aide d'un seul tiroir il obtient une admission variant entre 10 p. 100 et 75 p. 100 de la course, sans que les avances et la compression soient exagérées, même pour les plus faibles introductions. Nous aurons plus d'une fois l'occasion de retrouver M. Bonjour au cours de nos études sur les distributions de vapeur.

On ne saurait terminer ce qui concerne les machines à distribution ordinaire sans citer le nom de M. Joy (David), de Londres, inventeur d'un système de commande bien connu et fort en usage, surtout dans les machines marines; on sait que, dans la distribution Joy, le mouvement est pris sur la bielle, et que la variation de la détente

est produite par le changement d'inclinaison d'une coulisse ou le déplacement du centre d'articulation d'un lien oscillant; il est facile par le même procédé d'obtenir le changement de marche. Le système est loin d'être nouveau et les visiteurs de l'Exposition de 1878 avaient admiré une belle machine, construite par M. Brown, munie d'une distribution fondée sur un principe analogue. M. Joy n'en a pas moins le mérite d'avoir réalisé un agencement de pièces très satisfaisant, qui est d'ailleurs promptement et largement entré dans les usages de la pratique.

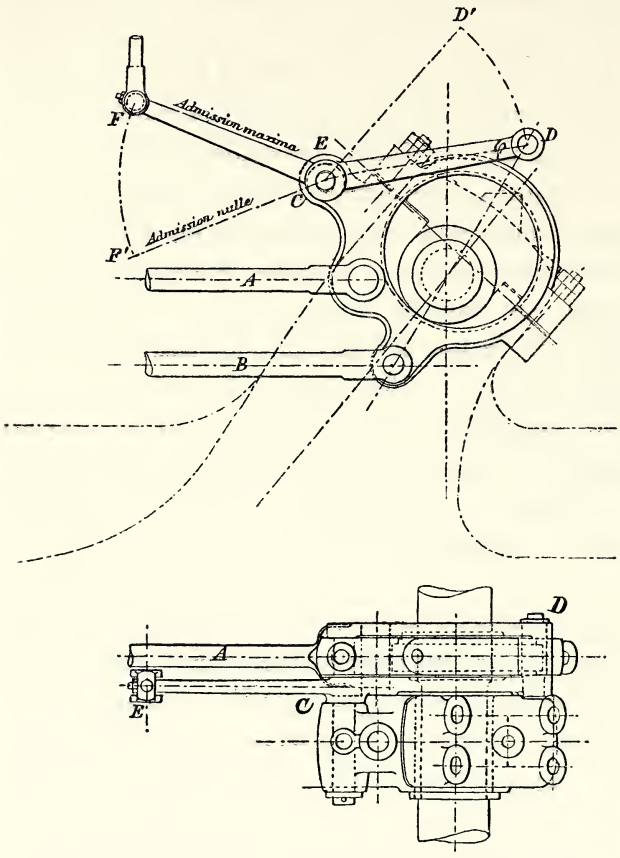


Fig. 91. — Compagnie des fonderies et forges de l'Horme. Distribution Bonjour.

Pour ne pas multiplier indéfiniment ces descriptions, nous passerons sous silence d'assez nombreuses machines de manufacture qui figuraient à l'Exposition, et nous arrivons tout de suite aux machines à grande vitesse, qui constituent l'une des caractéristiques les plus importantes de la construction mécanique moderne. Nous nous en tiendrons pour le moment aux machines à un cylindre, quitte à revenir ultérieurement sur l'étude des Woolf et Compound.

L'établissement des machines destinées à marcher aux allures rapides est subordonné à certaines conditions toutes spéciales. En ce qui concerne la distribution, les lumières doivent avoir des sections très larges, mais cette précaution serait encore insuffisante pour atténuer les effets fâcheux des laminages de vapeur, principalement à l'échappement; on la complète en donnant de fortes avances à la distribution. De plus, les grandes dimensions des lumières ont généralement pour résultat d'augmenter beaucoup les espaces nuisibles; c'est par la compression à la fin de la course du piston qu'on échappe à ces inconvénients. La compression a en outre un autre avantage : la vapeur comprimée exerce, en arrière du piston, une résistance qui renverse progressivement le sens des réactions réciproques des organes, supprime ou atténue les chocs et prépare efficacement le départ à fin de course.

Aux grandes vitesses de rotation, la commande de la distribution est nécessairement desmodromique; par conséquent, les distributeurs sont glissants et non levants. Par suite de la largeur des lumières, les tiroirs ordinaires prennent de grandes dimensions, et l'on applique fréquemment les procédés propres à diminuer le travail qu'absorbe leur mouvement, soit par l'emploi de plusieurs orifices, soit en équilibrant la pression qui applique le distributeur sur la glace.

Les organes de la transmission doivent être à la fois très légers et très robustes. Il importe au plus haut degré que l'action des masses en mouvement soit soigneusement étudiée et, autant que possible, exactement compensée, problème quelquefois très difficile. Les surfaces frottantes sont largement établies et le graissage actif et efficace, sinon les articulations chauffent et grippent rapidement. Le volant, tournant vite, est relativement léger; mais, s'il n'est pas bien construit, il peut se rompre et causer de graves accidents. Grâce à la rotation rapide de l'arbre, on peut le prendre comme axe du régulateur, l'action de la force centrifuge étant équilibrée par des ressorts. Souvent le régulateur ainsi disposé est agencé dans l'intérieur de la jante du volant, et, comme il est fort peu coûteux de donner beaucoup de poids aux masses excentrées, le régulateur devient ainsi très puissant et en état d'agir directement sur les organes de détente.

On a longtemps reculé devant ces grandes vitesses, devant les dangers qu'elles suscitent et les difficultés de toute nature qu'elles entraînent. Les nécessités nouvelles qui se sont manifestées ont contraint les mécaniciens à étudier le problème; la solution a été singulièrement facilitée par les progrès qu'ont réalisés les méthodes de calcul et les procédés de la construction mécanique. On avait craint longtemps que l'utilisation de la vapeur ne devînt très défectueuse dès que la vitesse dépasserait certaines limites; ces craintes étaient fort exagérées. Il est bien certain qu'une machine faite pour marcher lentement ne saurait, sans de graves inconvénients, être poussée à une vitesse un peu forte; car tous les éléments du fonctionnement doivent entrer en compte dans l'établissement des organes, et la vitesse est un des éléments les plus essentiels. Mais, dans une machine rapide convenablement proportionnée, l'effet utile de la vapeur peut être excellent, aussi bon qu'avec n'importe quelle machine lente; c'est ce que l'expérience a absolument démontré. Quant à l'explication du fait, il y a, dans les machines rapides, certaines circonstances qui tendent à améliorer le rendement; d'une part, les échanges de chaleur entre la vapeur et le cylindre ont moins de temps pour s'effectuer, et, à ce point de vue, les conditions se rapprochent du cas idéal où le cylindre serait constitué par une matière ne conduisant pas la chaleur; d'autre part, l'importance relative des fuites de vapeur autour du piston et des organes de distribution se trouve singulièrement atténuée.

Une machine rapide est d'une conduite plus difficile, d'un entretien plus coûteux et plus délicat; mais à égalité de puissance, elle coûte moins cher et tient moins de place qu'une machine lente, surtout eu égard aux transmissions supprimées.

La jolie machine de 4 à 5 chevaux exposée par la maison Escher, Wyss et Cie, de

Zurich, présente, dans son ensemble, les formes et dispositions de la machine monocylindrique qui a été décrite plus haut sous le nom de la même maison. Ses dimensions sont :

Diamètre du cylindre	150 millim.
Course du piston	150 —
Nombre de tours par minute	250

Elle peut être à volonté installée horizontalement sur un massif, ou appliquée verticalement contre un mur. A l'Exposition, elle était fixée le long d'une colonne. La distribution est faite par un simple tiroir en coquille; sur l'essieu, qui est en une seule pièce, sont montés des plateaux à contrepoids, qui donnent une grande douceur au mouvement. Le régulateur est dans le volant et actionne une valve cylindrique agissant par étranglement. Les dessins ci-joints (fig. 92) représentent avec clarté cette machine, fort intéressante par son élégance et sa simplicité.

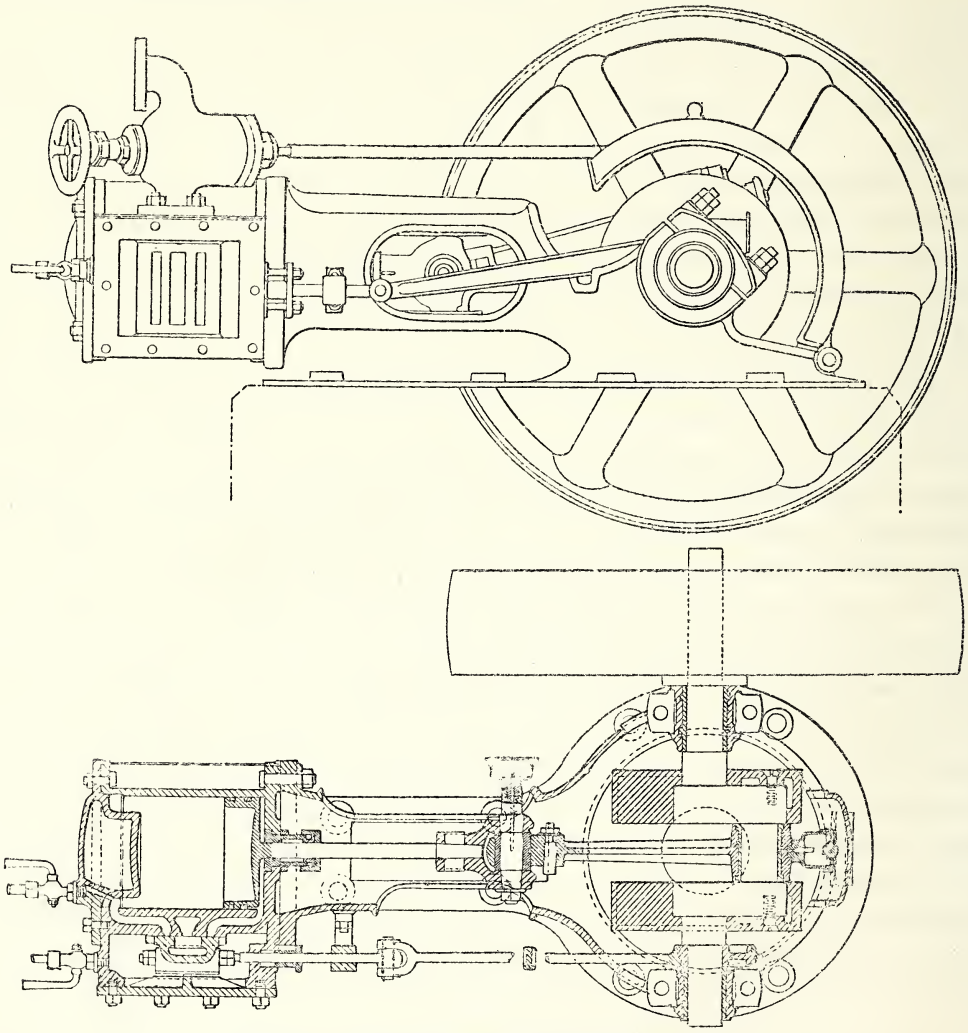


Fig. 92. — Machine Escher, Wyss et Cie, de Zurich.

La Société alsacienne de constructions mécaniques expose deux belles machines monocylindriques à grande vitesse, construites d'après le type combiné par MM. Armington et Sims, de Providence (États-Unis). Les dimensions de ces machines sont résumées dans le tableau ci-après :

Puissance normale	100 chev^x.	75 chev^x.
Diamètre du cylindre	370 millim.	360 millim.
Course du piston	380 —	610 —
Nombre de tours par minute	240	150

La machine de 75 chevaux se rapproche, par son allure, des types ordinaires de manufacture. La machine de 100 chevaux se prête bien à la commande des dynamos par une simple courroie jetée sur un de ses volants; elle est représentée dans la figure 93 ci-jointe. La distribution est faite par un seul tiroir, mû par un excentrique circulaire à centre variable sous l'action du régulateur. Les lumières éloignées sont desservies par un tiroir long en forme de piston, admettant par ses lèvres intérieures et échappant par ses extrémités. Le régulateur, placé à l'intérieur du volant, agit sur l'excentrique, en modifiant à la fois l'avance angulaire et le rayon d'excentricité. La transmission est simple et robuste; sur les joues du vilebrequin sont montés des plateaux à contrepoids. Le cylindre en porte à faux est fixé à l'extrémité du bâti.

La remarquable machine désignée sous le nom de Straight Line Engine était représentée à l'Exposition par plusieurs spécimens, construits par la Straight Line Engine Co., de Syracuse (États-Unis), et par la maison Steinlen et Cie, de Mulhouse (anciens ateliers Ducommun), avec quelques différences dans les détails. La machine représentée dans la figure 94 développe une puissance d'environ 100 chevaux, et ses dimensions sont les suivantes :

Diamètre du cylindre	355 millim.
Course du piston	406 —
Nombre de tours par minute	220

Le dessinateur s'est attaché à donner à tous les organes des formes simples, symétriques et, autant que possible rectilignes, de manière à faire travailler la matière dans les meilleures conditions. Le bâti, en forme de V, qui relie le cylindre aux paliers, comprend entre ses branches une paire de volants très rapprochés, dont les jantes laissent à peine entre elles le passage de la bielle. Un des points caractéristiques de cette machine, c'est le soin avec lequel on s'est efforcé de diminuer le nombre des assemblages, par l'emploi de pièces de fonte de grandes dimensions. Ainsi le cylindre, le bâti et les deux paliers sont d'une seule pièce; le tout est porté par deux socles, fixés sur une plaque de fondation plate et à peine nervée. Chaque volant porte à son centre un plateau-manivelle, venu de fonte avec lui, l'arbre étant en cinq pièces assemblées à

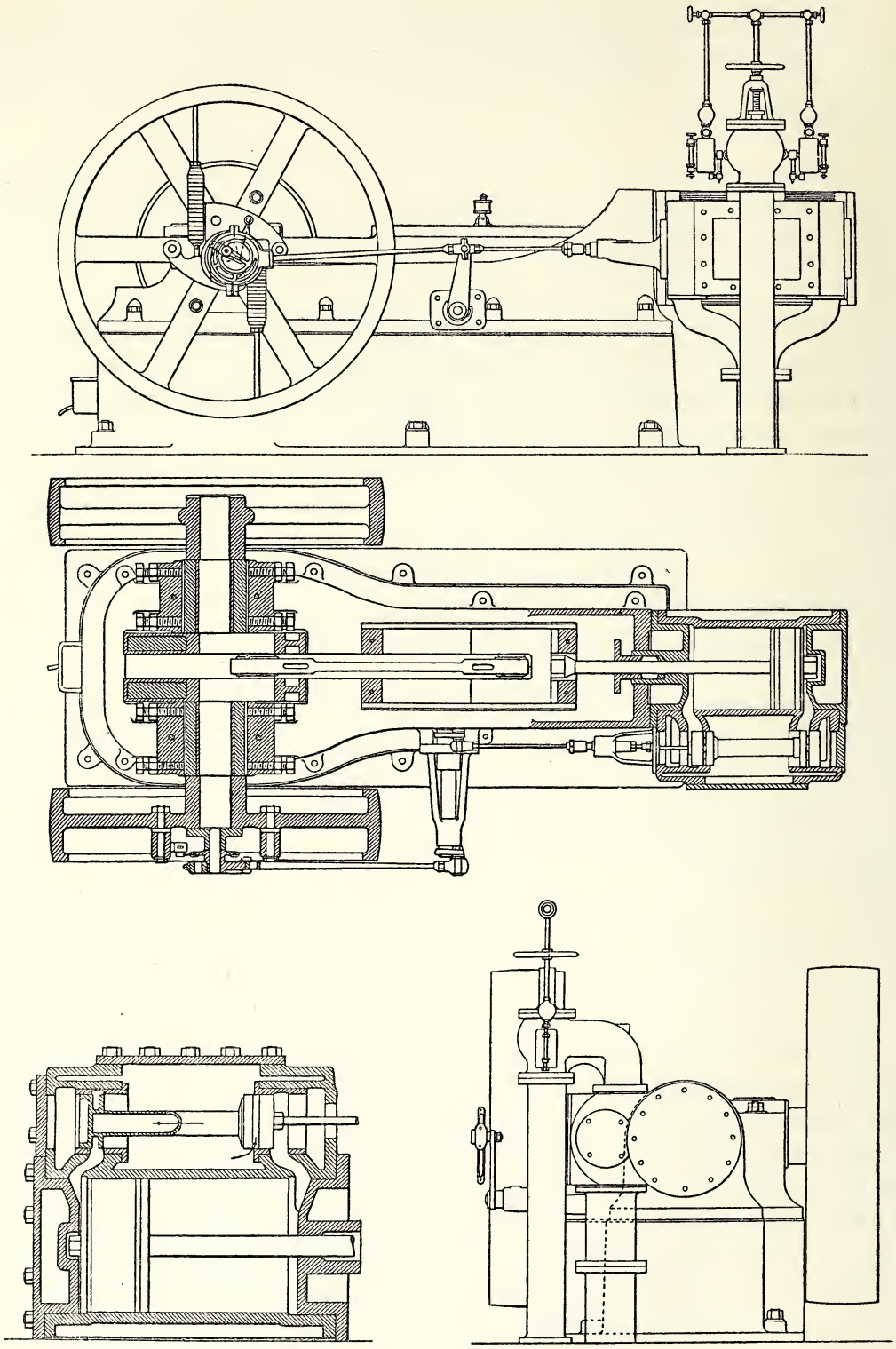


Fig. 93. — Machine à grande vitesse système Armington et Sims.

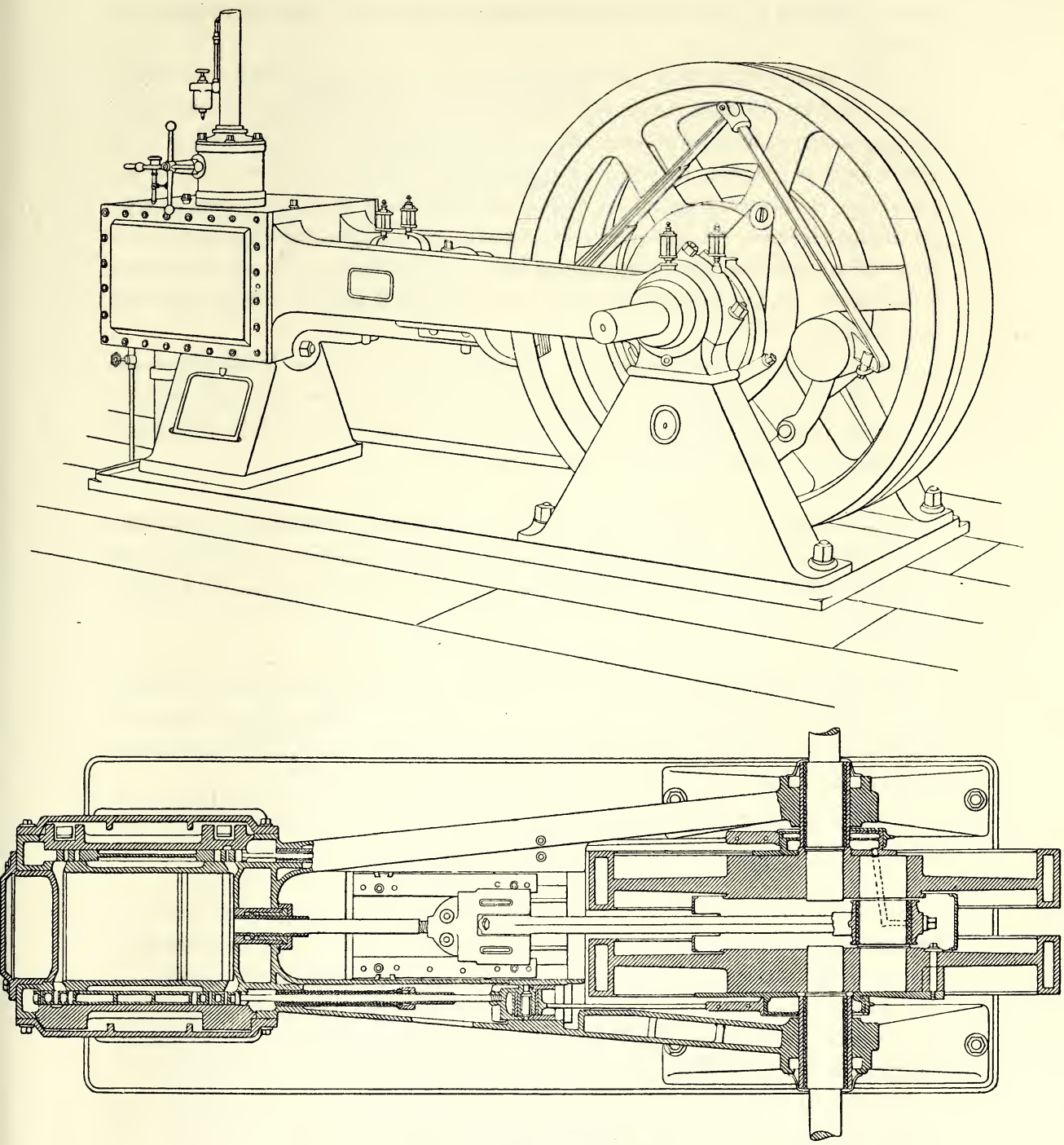


Fig. 94. — Straight Line Engine.

force. Ce n'est pas sans quelque appréhension que l'on examine ces grandes pièces de fonte, de formes compliquées, présentant des épaisseurs fort inégales et soumises à des efforts considérables; des accidents, heureusement sans conséquences

graves, survenus à l'une de ces machines pendant l'Exposition semblent légitimer ces craintes.

Quatre lumières fort courtes sont pratiquées aux extrémités du cylindre. La distribution est faite par deux tiroirs plats à jalousie, un pour l'admission, l'autre pour l'échappement; ces tiroirs sont surmontés de larges compensateurs, qui annulent presque entièrement la pression. Le tiroir d'échappement reçoit son mouvement d'un excentrique fixe, et donne une assez forte avance à l'échappement et une forte compression. Le tiroir d'admission est conduit par un excentrique à calage variable, permettant de faire varier l'admission dans d'assez larges limites, et l'arrangement est tel, que l'avance à l'admission est grande pour les grandes introductions et nulle ou négative pour les introductions restreintes.

Les presse-étoupe sont supprimés et remplacés par de longues douilles en métal blanc, qui donnent un joint à la fois très doux et suffisamment étanche, la machine étant sans condensation. Tous les détails de la construction sont étudiés d'une façon originale et avec une compétence pratique très précise.

La maison Sautter, Lemonnier et Cie exposait une machine-pilon d'environ 50 chevaux, tournant à 350 tours et ayant un piston de 250 millimètres de diamètre sur 300 millimètres de course. La marche était, à volonté, à condensation ou à échappement.

Nous nous contenterons de mentionner sommairement la très jolie machine présentée par les Ateliers d'OErlikon, de Zurich. Cette machine, de forme pilon, tournait à 520 tours, en développant environ 20 chevaux de puissance; son piston avait un diamètre de 200 millimètres et une course de 160 millimètres.

Nous aurons à revenir plus tard sur le type pilon d'OErlikon, en décrivant les machines compound exposées par cette maison.

La maison Lecouteux et Garnier, de Paris, a une exposition très importante, comportant un grand nombre de machines de divers types, et qui sont toutes monocylindriques. Celles que nous allons examiner actuellement sont spécialement étudiées en vue de l'éclairage électrique : pour cet usage, les constructeurs paraissent recommander plus particulièrement leur type pilon, et réserver le type horizontal pour les cas où l'emplacement disponible manque de hauteur.

Le type pilon, représenté fig. 95, comporte un solide bâti creux en fonte, qui reçoit, dans le haut, le cylindre à vapeur et porte dans le bas, par de très larges paliers garnis d'antifriction, les deux bouts de l'arbre à vilebrequin; celui-ci est en cinq pièces, avec deux plateaux-manivelles en acier fondu, chargés de contrepoids en plomb. La distribution est faite par deux lumières courtes et par des distributeurs en forme de pistons, portant des garnitures formées de cercles en fonte; pour en équilibrer le

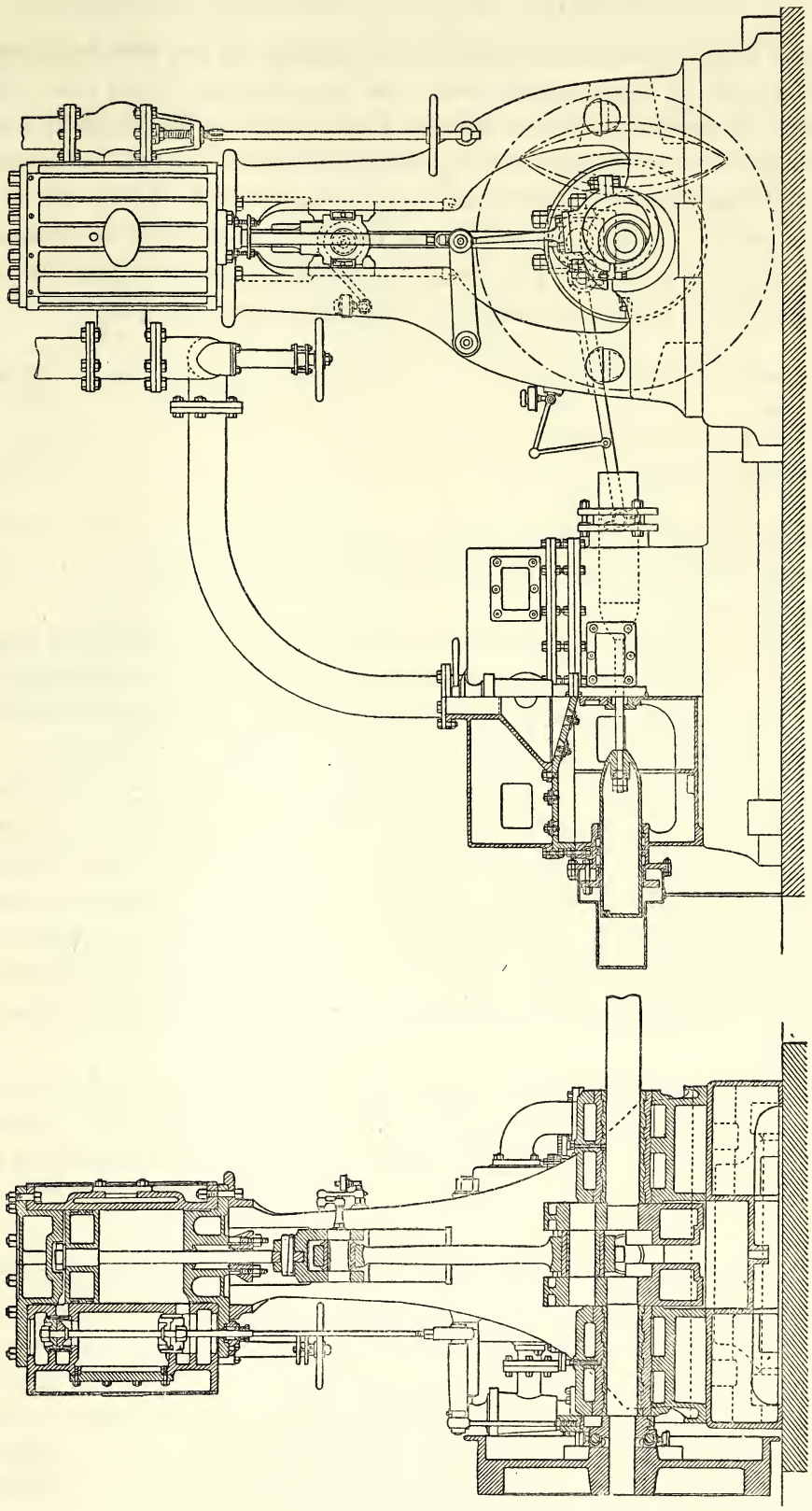


Fig. 95. — Machine type pilon Lecouteux et Garnier.

IMPRIMERIE NATIONALE.

poids, on a donné au distributeur supérieur un diamètre un peu plus fort qu'au distributeur du bas. La commande est donnée par un excentrique, lequel peut coulisser sur l'arbre, de manière à déplacer le centre d'excentricité et à faire varier la détente; ce déplacement est sous l'action d'un régulateur placé dans le volant. Le condenseur est disposé horizontalement en arrière du bâti; la pompe à air est à double effet, à deux plongeurs coniques opposés, commandés par une bielle prenant son mouvement sur la grosse tête de la bielle principale; toutes les articulations sont lubrifiées à la graisse semi-fluide à l'aide de tuyaux articulés. Les dimensions sont les suivantes :

Diamètre du piston	370 millim.
Course	330 —
Nombre de tours par minute	300
Puissance, environ	150 chev^x.

La vitesse moyenne du piston à cette allure est de 3 m. 30 par seconde; cette vitesse est dépassée notablement dans certaines machines du même type établies par la maison Lecouteux et Garnier.

La machine horizontale à grande vitesse construite par la même maison est à quatre distributeurs à mouvement circulaire alternatif, et ses dispositions générales sont semblables à celles du type Corliss, dont les exposants exploitent les brevets; seulement la commande par déclenchement, qui ne s'accommode pas des allures rapides, est ici remplacée par une commande desmodromique (fig. 96). L'admission et l'échappement sont actionnés par deux excentriques distincts, à l'aide d'une transmission à rapport variable de vitesse. L'excentrique d'échappement est fixe; l'excentrique d'admission peut coulisser sur l'arbre de couche, de manière à faire varier la détente; sa position est déterminée par un régulateur placé dans le volant. En outre, dans plusieurs des machines construites sur ce type, l'uniformité de la marche est assurée par un régulateur spécial, actionnant une valve cylindrique, qui agit par étranglement de la conduite d'amenée.

La station centrale d'électricité du quai d'Orsay contenait deux machines du type que nous venons de décrire. Ces machines, qui tournaient à 180 tours, pouvaient s'accoupler sur un même arbre de transmission, en développant une puissance d'environ 170 chevaux.

Nous arrivons actuellement aux machines pourvues d'une distribution par déclenchement, lesquelles formaient une des parties les plus nombreuses et les plus brillantes de l'Exposition. Les machines à déclenchement ont fait leur apparition à l'Exposition de 1867; deux systèmes de distribution de ce genre y étaient représentés : la distribution *Corliss,* comportant quatre distributeurs circulaires glissants, animés d'un mouvement de rotation alternatif, et la distribution *Sulzer,* à quatre soupapes équilibrées. De ces deux types primordiaux ont découlé un nombre immense de dérivés s'en rap-

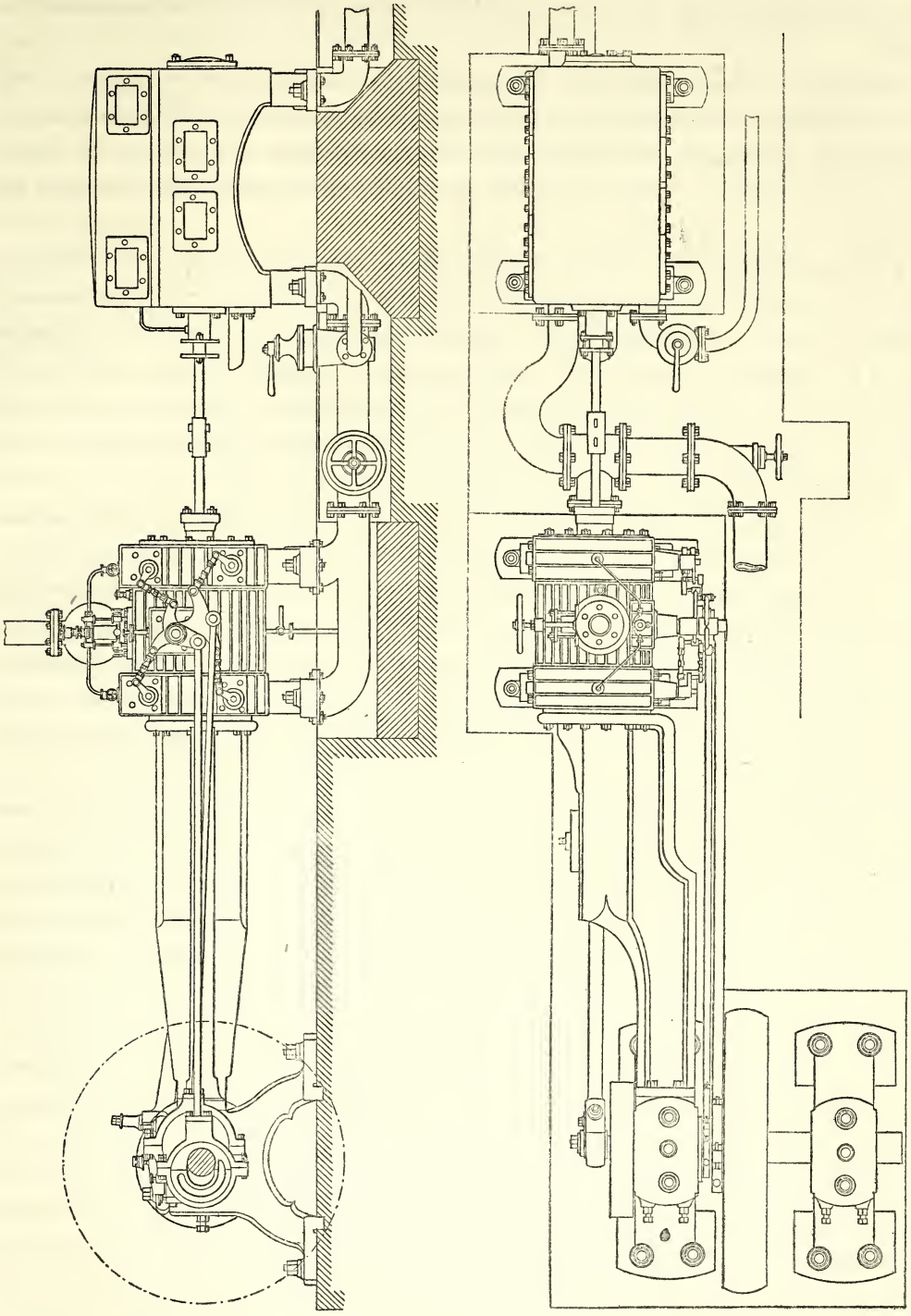


Fig. 96. — Machine horizontale, type Corliss, Lecouteux et Garnier.

prochant plus ou moins : la commande des distributeurs a été modifiée de bien des manières; on a substitué des tiroirs plans aux tiroirs circulaires; dans certains cas, on a réduit à deux le nombre des lumières. Mais, les principes étant posés, l'on ne s'en

est guère écarté, et tout s'est borné à quelques variétés et à des perfectionnements de détail.

En général, dans les machines en question, la commande de l'échappement est desmodromique; la fermeture seule de l'admission est obtenue par déclenchement. Le distributeur d'admission, une fois le déclic lâché, est rappelé à sa position de fermeture par un ressort, un poids, un piston pressé, etc.; et le mouvement de rappel est modéré par un *dash-pot,* frein à air ou à eau.

Pour que le rappel fonctionne convenablement et sûrement, il faut que la résistance opposée au mouvement par le distributeur soit assez petite et que les frottements soient faibles. Les tiroirs circulaires Corliss satisfont bien à cette condition; les soupapes Sulzer la remplissent mieux encore; les tiroirs plats sont peut-être moins satisfaisants. D'autre part, les espaces nuisibles peuvent être considérablement réduits avec les distributeurs Corliss. Mais cette question des espaces nuisibles est liée étroitement à celle de la compression, et nous aurons à y revenir.

Le déclenchement résulte du contact d'une des pièces mobiles de la transmission avec un organe relativement fixe et dont la position est déterminée par le régulateur. Cet organe étant entièrement libre pendant la plus grande partie de la révolution de la machine, le régulateur peut, avec la plus grande liberté, prendre sa position d'équilibre; cette aisance dans l'action du régulateur sur la distribution et la remarquable uniformité de marche qui en résulte sont un des avantages les plus précieux que présente ce genre de machines, un de ceux qui ont, sans nul doute, le plus contribué à en assurer le succès.

Comme dans les commandes à repos, le contact ne peut s'établir, entre l'organe mobile et l'obstacle fixe, que pendant la moitié au plus d'une révolution de la machine. Si l'on applique cette donnée à l'étude d'une distribution, on constate que l'admission ne saurait dépasser, théoriquement parlant, la moitié, et, en pratique, le tiers environ de la course; si l'obstacle fixe a une position telle que le contact ne s'établisse pas avant que le piston ait atteint le tiers du cylindre, le déclenchement cesse de se produire et l'introduction a lieu presque jusqu'à fin de course; c'est-à-dire que la distribution se fait dans de fort mauvaises conditions. On est parvenu, par divers artifices, à tourner cette difficulté; mais nous supposerons pour le moment qu'elle subsiste tout entière, comme c'est le cas dans la plupart des machines dont il s'agit. Dans ces conditions, la distribution en question ne convient que pour les machines marchant toujours à grande détente; et même, pour ne pas diminuer outre mesure l'admission, on est forcément amené à réduire beaucoup l'avance angulaire, et par suite les avances et la compression. Ce dernier inconvénient serait grave, mais il peut être beaucoup atténué si les espaces morts sont petits; ce que l'on obtient facilement, dans les machines à déclenchement, en soignant l'ajustage et en faisant les lumières courtes.

Cette considération des espaces nuisibles n'est nullement un obstacle à ce que les lumières aient des sections largement suffisantes. L'objet principal des distributions

dont il s'agit, c'est de supprimer tous les obstacles au libre passage de la vapeur; il serait donc tout à fait illogique d'étrangler cette dernière dans des canaux trop étroits. En fait, dans la pratique, les lumières des machines à déclenchement sont en général largement établies, même eu égard à la vitesse du piston, qui est ordinairement grande. Cette vitesse constitue d'ailleurs un des avantages les plus précieux de ce genre de machines, qui deviennent ainsi, pour une puissance donnée, moins chères et moins encombrantes.

Dans la distribution ordinaire, une pièce unique, le tiroir, fait l'admission et l'échappement successivement sur les deux faces du piston; il y a ainsi quatre fonctions dévolues à un seul et même organe solide et qui sont, par conséquent, sous la dépendance étroite l'une de l'autre; on ne peut toucher à l'une d'elles sans que les trois autres en ressentent le contre-coup. En divisant le travail, en le répartissant entre quatre distributeurs, on a considérablement facilité, non seulement l'établissement, mais aussi le réglage de la distribution; de plus, chaque distributeur est constitué par une pièce simple et légère, même lorsque les orifices à desservir ont de grandes dimensions.

Une autre question a été soulevée : la plupart des distributions par déclenchement comportent des orifices distincts pour l'admission et pour l'échappement. Suivant quelques auteurs, cette disposition présente des avantages sérieux au point de vue économique : l'action condensante des parois refroidies par l'échappement se trouverait fortement diminuée. Théoriquement, l'avantage est certain, mais il est difficile d'en chiffrer la valeur pratique; il est un fait bien constaté, c'est que certaines machines portant seulement deux lumières de distribution, c'est-à-dire dans lesquelles l'échappement se fait par les mêmes orifices que l'admission, donnent des résultats économiques tout à fait satisfaisants.

Nous décrirons successivement les machines dont il s'agit dans l'ordre suivant :

Machines à quatre lumières avec distributeurs tournants, genre Corliss;

Machines à quatre lumières avec tiroirs plats;

Machines à deux lumières;

Machines à quatre soupapes, genre Sulzer.

Nous serons conduit plus d'une fois, dans ce qui va suivre, à anticiper plus ou moins sur l'étude des expansions multiples.

La maison Lecouteux et Garnier, de Paris, a adopté, comme dispositif de ses machines de manufacture, le type Corliss, tel qu'il figurait à l'Exposition de 1867, comportant quatre distributeurs cylindriques, avec commande à rapport variable de vitesses pour l'échappement, et commande par déclenchement pour l'admission; le rappel à la fermeture est obtenu par de grands ressorts plats; l'enclenchement est donné par une bascule articulée en potence au sommet d'une grande pièce oscillante, dite *porte-ressort;* ce dernier, relié à l'excentrique par une commande desmodromique, est muni d'une longue rainure, dans laquelle vient se loger le grand ressort de rappel.

Ces dispositions, ainsi que les formes générales des organes, telles qu'elles ont été établies par Corliss, sont scrupuleusement observées dans les machines établies par MM. Lecouteux et Garnier. Ces constructeurs ont tenu à respecter le type primitif, et se sont contentés d'améliorer les détails.

Ce type, devenu classique, est trop connu de tous les mécaniciens pour qu'il soit utile de le décrire de nouveau; nous nous contenterons d'étudier les modifications qui y ont été apportées.

Dans la machine de Corliss, l'introduction de vapeur ne dépassait guère le tiers de la course du piston; le déclenchement ne pouvait se produire que dans le mouvement direct de la commande du distributeur, c'est-à-dire lorsque l'organe actionnant la tige du tiroir poussait celui-ci dans le sens de l'ouverture. Par un artifice ingénieux, MM. Lecouteux et Garnier sont parvenus à tourner cette difficulté.

La figure 97 représente la commande de la distribution. *A* est la tige du tiroir, constamment sollicitée dans la direction *B* par un ressort, qui tend à ramener le distributeur à la position de fermeture; mais la touche *a*, fixée sur cette tige, vient mordre sur la touche *b* et en suit tous les mouvements (fig. 97 *b* et 97 *d*); cette touche *b* est portée par le nez d'une potence *ED*, articulée en *C* sur le haut du porte-ressort, lequel oscille de *C'* en *C''* sous l'action de l'excentrique. Le mouvement ayant lieu de *C'* vers *C''*, c'est-à-dire dans le sens de la flèche *K* (fig. 97 *a*), il arrive un moment où la queue *EC* de la

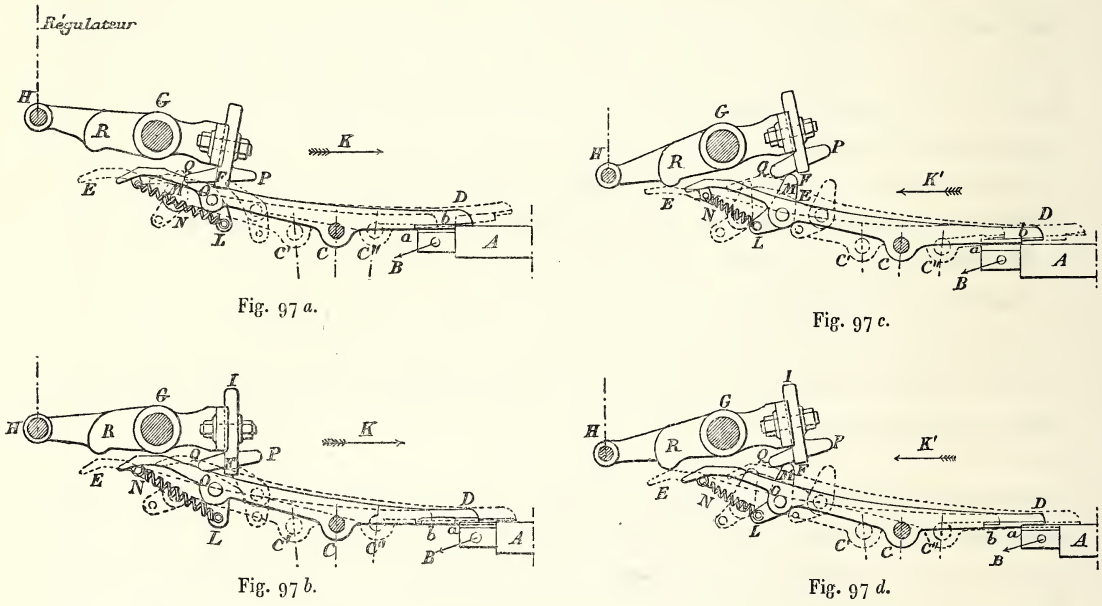


Fig. 97 *a*. Fig. 97 *c*. Fig. 97 *b*. Fig. 97 *d*.

Fig. 97. — Machine horizontale Lecouteux et Garnier. — Commande de la distribution.

potence vient au contact de la palette *F*; la potence bascule, son nez *D* se relève, la touche *a* échappe, et, sous l'action du ressort *B*, la fermeture de l'admission a lieu. Cette palette *F* est fixée sur la brimballe *GH*, oscillant autour de l'axe fixe *G* sous l'ac-

tion du régulateur attaché en *H*; sa position est donc susceptible de varier, ce qui fait varier également l'instant du contact, c'est-à-dire de la fermeture de l'admission. Si le régulateur est trop bas, le contact cesse de se produire, le déclenchement n'a plus lieu, et la commande de la distribution devient desmodromique (fig. 97 *b*). On voit d'ailleurs que le déclenchement ne peut se faire que lorsque le mouvement a la direction de la flèche *K*; dans le mouvement inverse (*K'*), la potence s'éloigne de la palette et ne peut la toucher.

Telle était l'ancienne disposition Corliss. Pour éviter l'inconvénient qui vient d'être signalé, MM. Lecouteux et Garnier montent sur la potence le taquet mobile *LM*, et sur la palette *F* la contre-palette *PQ*, dont la face inférieure est inclinée. Le taquet *LM* est articulé en *O* et rappelé à la position verticale par le ressort *N*. Quand le régulateur est suffisamment élevé (fig. 97 *a*), le taquet reste couché, étant appuyé par la contre-palette; lorsque, au contraire, le régulateur s'abaissant, le déclenchement n'aurait plus lieu dans le mouvement direct, le taquet se redresse (fig. 97 *c* et 97 *d*) et, dans le mouvement rétrograde *K'*, il s'appuie sur la face inférieure de la contre-palette et donne le déclenchement. On voit combien ce dispositif est ingénieux, mais en même temps délicat. Disons tout de suite que des appareils ayant le même objet, fondés sur les mêmes principes, mais différents comme agencement, avaient été appliqués sur certaines machines figurant à l'Exposition de 1878.

Il arrive quelquefois que, par suite de la chute de la courroie, ou pour toute autre cause, le régulateur cesse de tourner : il tombe alors au bas de sa course, l'admission s'ouvre en grand, la machine s'emporte, et de graves accidents peuvent survenir. Dans les machines que nous étudions, ce danger est évité par un artifice bien simple : la brimballe porte un talon *R*, qui vient porter sur la queue suffisamment prolongée de la potence; celle-ci reste constamment en bascule, par conséquent l'enclenchement ne peut plus se faire; l'admission se trouve fermée et la machine s'arrête.

En dehors de ces perfectionnements apportés à la distribution, les machines de MM. Lecouteux et Garnier se distinguent par une exécution fort soignée dans tous ses détails. L'enveloppe de vapeur est en deux parties, réunies au milieu de la longueur du cylindre par un joint boulonné; on obtient ainsi des espaces morts extrêmement réduits; de plus, les pièces de fonte sont simples de forme et le déplacement du cylindre par rapport à son enveloppe n'est plus à redouter. Les pièces du mouvement sont en acier doux et demi-doux. Les organes de la distribution sont cémentés, trempés et rectifiés à la meule.

La maison exposait plusieurs machines du type que nous venons de décrire :

Dans le Palais des Machines, une machine dans la classe 52, actionnant la transmission et donnant 150 chevaux à 65 tours par minute;

Deux machines conjuguées dans la station centrale d'électricité du jardin d'isolement, développant ensemble 500 chevaux à la vitesse de 65 tours;

Deux machines conjuguées fournissant 300 chevaux à la station centrale d'électricité, sur la berge du quai d'Orsay.

Parmi les machines du type Corliss de 1867, il convient de mentionner la belle machine exposée par la maison V. Brasseur, de Lille; les dimensions étaient :

Diamètre du cylindre	457 millim.
Course du piston	1,067 —
Nombre de tours par minute	54
Puissance, environ	110 chev^x.

Cette machine, dont l'exécution était, pour ainsi dire, parfaite, comportait, en outre, quelques détails ingénieux, entre autres une soupape ayant pour objet d'éviter les coups d'eau dans le cylindre : c'est une soupape à flotteur, montée sur le condenseur, et qui admet l'air extérieur et rompt le vide, dès que le niveau de l'eau dépasse une hauteur déterminée. La maison Brasseur exposait aussi une belle machine compound, du type Corliss de 1867.

Dans l'un des emplacements les plus en vue du Palais était installée une puissante et magnifique machine, exposée par M. Joseph Farcot, de Saint-Ouen (Seine) et digne en tout de la réputation des ateliers dont elle est sortie. La maison Farcot, on le sait, a pris une large part à l'introduction et au développement de la construction mécanique dans notre pays. Elle fut fondée, en 1823, par Marie-Joseph-Denis Farcot, qui en resta le chef jusqu'à sa mort, survenue en 1875. Son fils, M. Joseph Farcot, qui, depuis trente ans, était son collaborateur, lui succéda, et demeure à la tête de la maison. Suivant la tradition de la famille, il se fait seconder par ses fils, dont l'aîné, M. Paul Farcot, est l'auteur des grandes installations récentes et des nouveaux types exposés dans la classe 52. Cette maison s'est toujours distinguée, non seulement par les soins apportés à l'exécution de ses machines, mais aussi par la recherche, souvent heureuse, de solutions nouvelles aux problèmes qui se posent chaque jour en mécanique. Parmi les nombreuses inventions qui sont sorties de ces études, il nous suffira de citer la distribution Farcot (1836), le régulateur à bras croisés (1854-1856) et le servo-moteur (1868), appareils classiques, qui ont servi de point de départ à un grand nombre d'inventions importantes. Les galeries de l'Exposition de 1889 renfermaient de nombreuses machines présentées par la maison Farcot, et qui toutes étaient remarquables par une irréprochable exécution et surtout par la recherche du progrès et de l'invention, qui caractérise les produits de cette célèbre usine.

La grande machine que nous allons décrire a les dimensions suivantes :

Diamètre du piston	1,000 millim.
Course	1,800 —
Nombre de tours par minute	42
Diamètre du volant	10 mètres.
Puissance développée	500 à 1,200 chev^x.

La figure 98 représente cette magnifique machine. Elle reproduit, dans ses traits

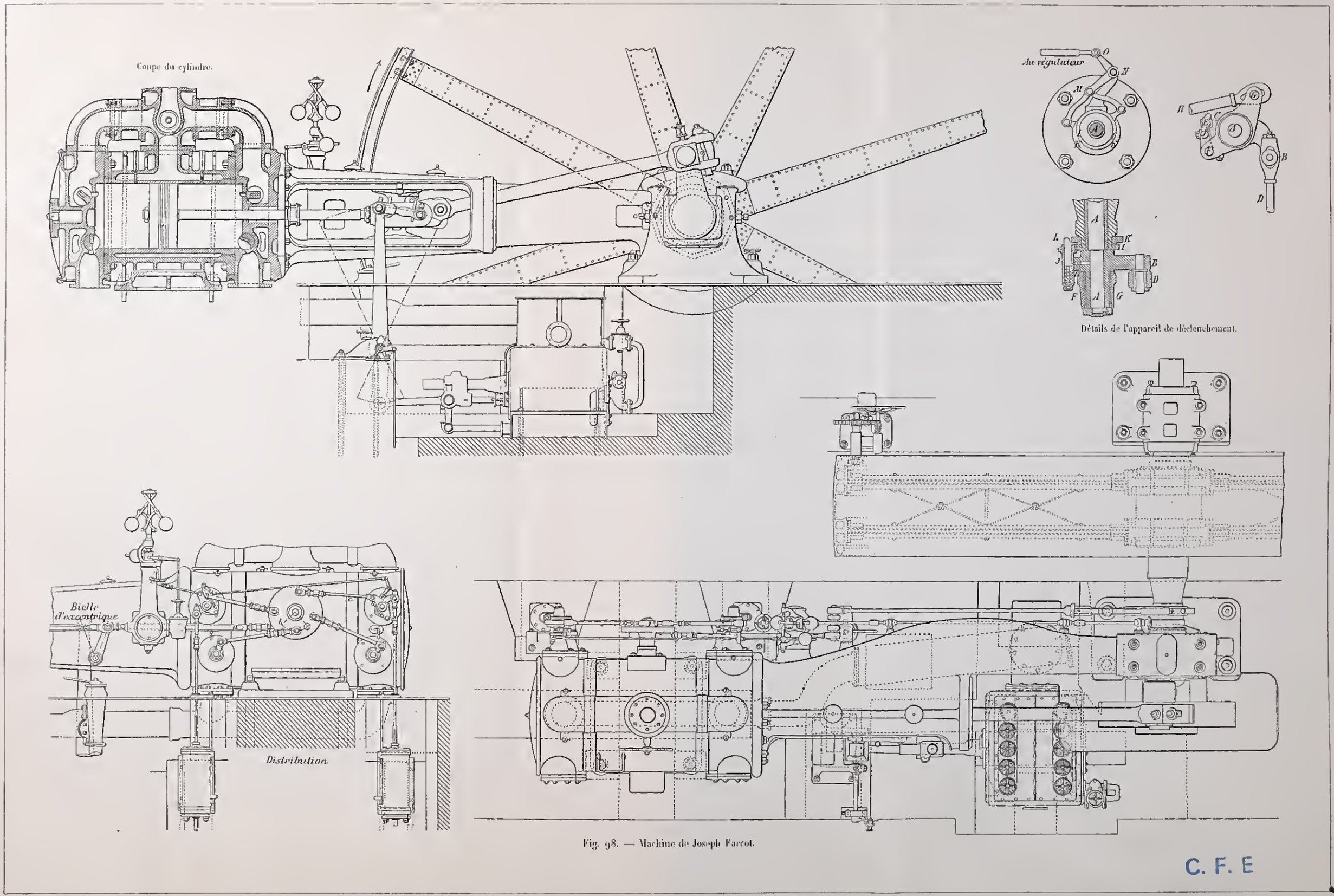


Fig. 98. — Machine de Joseph Farcot.

C. F. E

essentiels, la machine de la même maison qui figurait à l'Exposition de 1878. Elle comporte quatre lumières, venues dans les fonds du cylindre, ce qui réduit à fort peu de chose les espaces nuisibles : les distributeurs sont cylindriques et du genre Corliss; les distributeurs d'échappement ont la forme de demi-cylindres et, dans la position de fermeture, ils remplissent la cavité dans laquelle ils jouent et s'effacent dans le plan du fond du cylindre.

La commande des distributeurs est à rapport variable de vitesses; de plus, la commande d'admission est à déclenchement, avec dispositif de déclenchement en retour pour les grandes admissions, ce qui permet de faire varier l'admission de 0 à 80/100 de la course du piston. L'appareil de déclenchement est circulaire et centré sur l'axe *AA* du distributeur. La pièce *BC* est solidaire de cet axe; elle est sollicitée par un piston tirant sur *D*, et qui tend constamment à ramener le distributeur à la position de fermeture. L'enclenchement produit entre les deux touches *C* et *E* empêche ce mouvement et, tant qu'il subsiste, le distributeur reste solidaire de la pièce *FG*, à laquelle il est rattaché par le doigt *FE* articulé en *F*. La pièce *FG* est attaquée en *G* par la bielle d'excentrique *GH*; si le doigt *FE* est écarté, le déclenchement a lieu, et le distributeur, rappelé par la traction exercée en *D*, se ferme brusquement; ce déplacement du doigt *FE* est obtenu par le contact de la came *J* montée sur ce doigt, avec la jante de l'excentrique à onde *I*.

Pour les grandes admissions, un second excentrique à onde *K* vient agir sur le verrou *L*, qui, poussé par un ressort à boudin, sort du logement dans lequel il est enfermé pour les faibles introductions. Les deux excentriques sont montés librement sur le col de la boîte du tiroir, et sont déplacés par le levier coudé *MNO*, actionné en *O* par la tige du régulateur.

Le régulateur est à bras croisés du système Farcot; il est sous la dépendance d'un petit volant à main, qui permet la mise en marche progressive. L'anneau de déclenchement est découpé de manière à faire cesser l'introduction et arrêter la machine dans le cas où, pour une cause quelconque, le régulateur viendrait à tomber au bas de sa course. Tous les organes de la machine sont solides, bien étudiés, d'une construction irréprochable. Le cylindre est à enveloppe distincte, avec joint au cuivre rouge; les fonds rapportés assurent la fixité de la chemise intérieure; les passages de la vapeur sont largement établis; l'enveloppe de vapeur comporte une circulation spéciale et très active de vapeur; elle entoure largement les fonds et elle est efficacement purgée; des précautions sont prises pour assurer un portage uniforme des fusées de l'arbre dans ses coussinets. Le volant, qui forme poulie, a 10 mètres de diamètre; il se compose d'une jante mince en fonte nervée, pesant 21,000 kilogrammes, de 1 m. 50 de largeur, assemblée sur deux plans de bras en tôle rivés et entretoisés, de section elliptique. Ce volant, dont la jante a été tournée sur place, porte, en dedans de sa circonférence, une denture spéciale, qui a servi à cette opération, et sur laquelle vient agir un petit vireur, qui sert à la mise en marche et qui, par une disposition ingénieuse, se désengrène de lui-même au départ.

La maison Farcot exposait une autre machine, de la même construction, et d'une puissance moyenne de 150 chevaux.

La maison Schneider et Cie, du Creusot (Saône-et-Loire), exposait une fort belle machine horizontale à un cylindre et à condensation. Cette machine tournait à vide et n'actionnait aucune transmission. Les dimensions principales sont les suivantes :

Diamètre du cylindre	750 millim.
Course du piston	1,400 —
Nombre de tours par minute	60

En allure normale, elle donne environ 450 chevaux de puissance. La figure 99 reproduit les principales lignes de cette machine. Sauf quelques modifications, elle est exécutée conformément aux brevets pris par Corliss en 1879, et ressemble par plus d'un point à la grande machine exposée à Anvers par la maison Van den Kerkhove. Le cylindre, son enveloppe de vapeur ainsi que ses quatre boîtes de distribution, son couvercle et ses pattes d'appui constituent un ensemble venu de fonte en une seule pièce. Les usines du Creusot nous ont habitués à ces tours de force de fonderie, que d'autres ateliers moins bien outillés n'aborderaient pas sans témérité. Sur les deux extrémités du cylindre viennent s'assembler, d'une part, le fond, d'autre part, le bâti à baïonnette. La pompe à air est à la suite du cylindre, et manœuvrée par le prolongement de la tige du piston; les clapets sont métalliques et du système Corliss.

La distribution est obtenue par quatre obturateurs Corliss, à rotation alternative; les obturateurs d'échappement sont placés assez bas pour qu'en aucun cas ils ne soient exposés à être rencontrés par le piston dans ses excursions. La commande des quatre distributeurs est à rapport variable de vitesse. A cet effet, l'excentrique attaque une grande pièce en fonte, oscillant autour d'un axe fixé sur le cylindre, et qui, en raison de sa forme, a reçu le nom d'*écrevisse* ou d'*araignée;* les bras de l'écrevisse, s'étendant jusque dans le voisinage des axes à commander, les attaquent à l'aide de courtes bielles; la durée de l'immobilité relative des obturateurs aux extrémités de leur oscillation se trouve ainsi fort prolongée. Ce léger avantage est peut-être payé un peu cher : l'écrevisse, qui d'ailleurs se retrouve sur plusieurs des machines de l'Exposition, est un organe volumineux, disgracieux, et dont la solidité est plus ou moins suspecte. L'admission est commandée par un déclenchement soumis à l'action du régulateur. Le rappel à la fermeture est obtenu par des pistons à vide avec dash-pot.

Le régulateur est du système Porter, c'est-à-dire à grande vitesse de rotation et surcharge constante; en outre, il est surchargé d'un contrepoids à bras de levier variable, permettant de faire varier la vitesse de la machine entre des limites assez étendues; il est muni d'un frein liquide; il agit sur le déclenchement à l'admission.

Cette belle construction est remarquable, sinon par l'originalité du système, du moins par l'excellent choix des matériaux et la supériorité de l'exécution. Divers membres

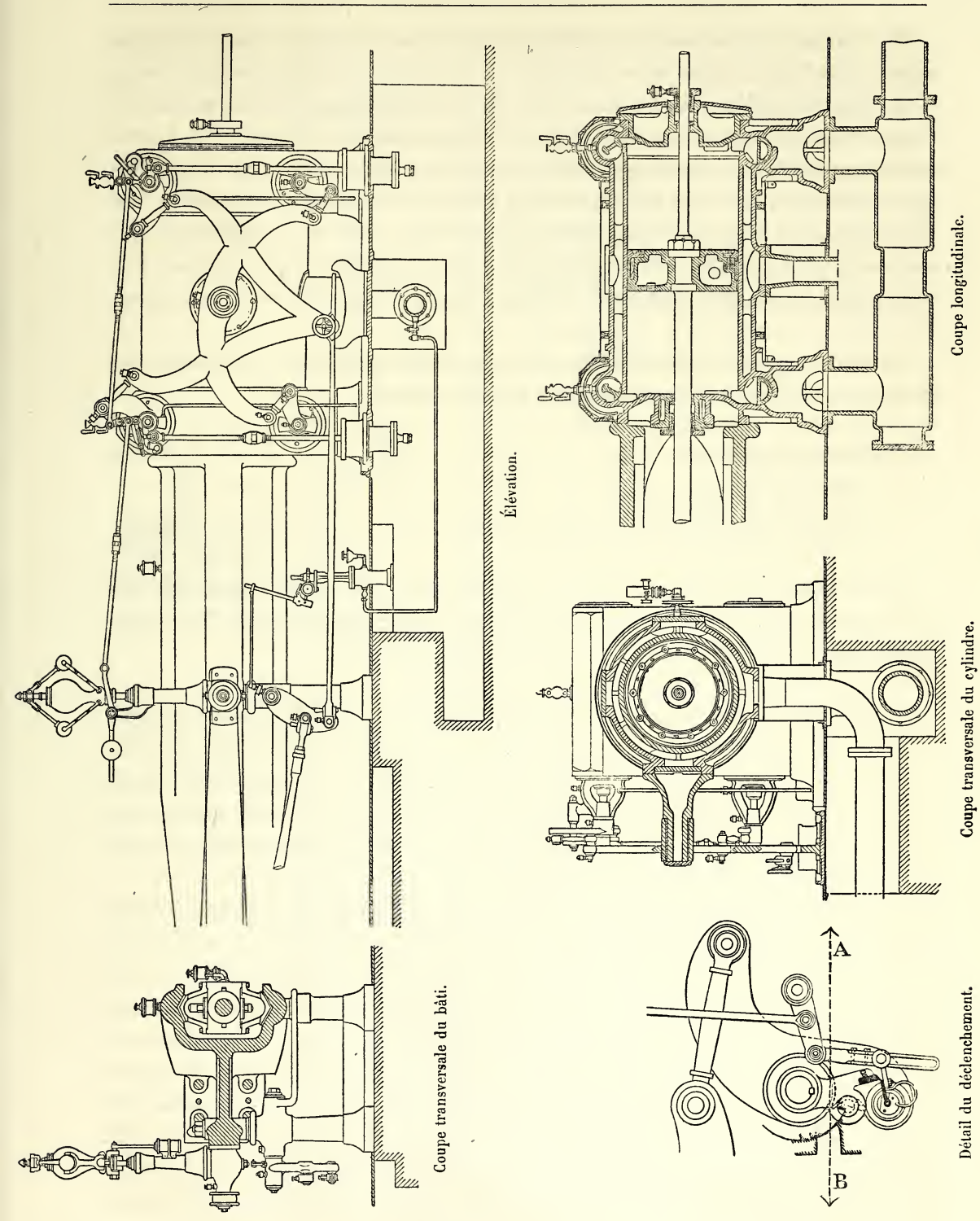


Fig. 99. — Machine Corliss du Creusot.

du jury ont exprimé leur regret de ne voir figurer à l'Exposition que cet unique spécimen des admirables machines que le Creusot livre, soit à la marine, soit à l'industrie.

En terminant cette description de l'Exposition du Creusot, il serait injuste de ne pas rappeler les études auxquelles cet établissement s'est livré, études d'une longue durée et d'une haute importance, sur les conditions pratiques du fonctionnement des machines à vapeur. Ces études ont eu pour effet de préciser nombre de points obscurs, et de fournir aux constructeurs des données qui leur faisaient défaut sur les proportions à appliquer aux machines, les pressions, les vitesses et les degrés de détente les plus favorables, etc. Elles constituent le complément pratique des recherches de Hirn, et confirment de la manière la plus complète cette conclusion générale, à laquelle il avait été amené, à savoir, qu'il ne saurait être établi *a priori* aucune théorie générique de la machine à vapeur.

La machine présentée par MM. Darblay, père et fils, constructeurs à Essonnes, actionnait la machine à papier exposée par la même maison :

Diamètre du cylindre	330 millim.
Course du piston	685 —
Nombre de tours par minute	85
Puissance (admission au 1/10, pression de 5 kilogr. 5)	40 chev^x.

Cette machine est du genre Corliss, à condensation. Les tiroirs cylindriques sont logés dans les fonds du cylindre. Le régulateur, genre Proëll, est armé d'un contrepoids mobile, permettant de faire varier la vitesse.

C'est ici le lieu de parler d'un système de distribution par déclenchement, imaginé par M. Frikart, ingénieur civil; ce dispositif, intéressant et ingénieux, a eu un véritable succès auprès des constructeurs; il était appliqué sur plusieurs des plus importantes machines de l'Exposition.

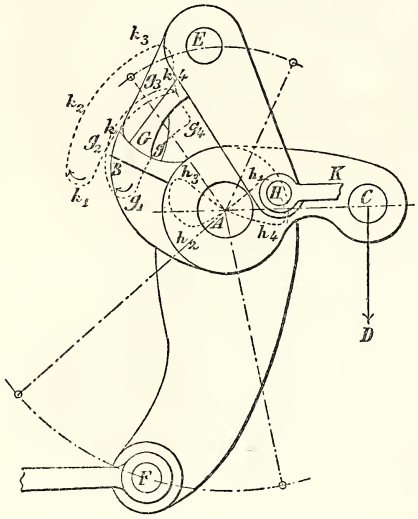


Fig. 100. — Distribution Frikart, déclenchement.

Imaginons (fig. 100) un tiroir d'admission Corliss, tournant autour de l'axe *A* et solidaire du levier *BC*, lequel, sous l'action d'une force *D*, ressort, poids ou piston, tend constamment à ramener l'obturateur à la position de fermeture; la touche *B* reçoit le contact du doigt *G* qui, en temps utile, ouvre et tient ouvert l'obturateur; sur ce même axe *A* se meut librement un levier *EF*, qui reçoit, d'un excentrique calé sur l'arbre de couche, un mouvement oscillatoire, par l'intermédiaire d'une bielle attaquant le point *F*.

En *E* est articulé le doigt *EG*, qui agit en *G* par contact sur la touche *B*; ce doigt est solidaire du levier *EH*, qui reçoit son mouvement de la bielle oscillante *HK*. Les

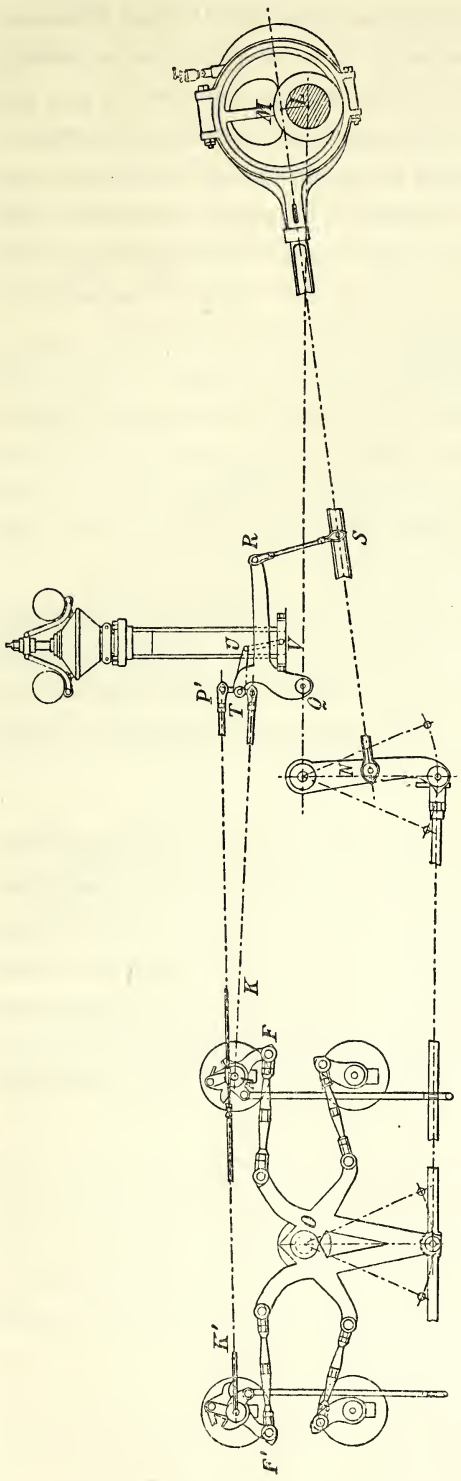


Fig. 101. — Distribution Frikart. Ensemble de la distribution.

mouvements oscillatoires du point E autour du centre fixe A et du point H autour du centre mobile E sont combinés de telle façon que H est à l'extrémité de sa course lorsque E est à peu près au milieu de la sienne, et réciproquement; il en résulte que H décrit une courbe en 8 indiquée par les lettres h_1 h_2 h_3 h_4, et que l'extrémité g du doigt G décrit la courbe $g\,g_1\,g_2\,g_3\,g_4$, qui détermine le déclenchement dans les environs de g_2. On voit, sur la figure, que l'arc pendant lequel le doigt G reste en contact avec la touche B est fort étendu, ce qui permet des admissions beaucoup plus longues qu'avec les systèmes à déclenchement ordinaires. Si, tout restant dans le même état, l'on vient à allonger la tige HK, la courbe en 8 se trouve reportée tout entière sur la gauche; il en est de même de la courbe décrite par la lèvre g; la courbe en $g\,g_1$ est ainsi transportée en $k\,k_1\,k_2\ldots$ et la durée de l'admission est réduite dans une proportion plus ou moins étendue, jusqu'à être ramenée à 0 degré. Cet effet s'obtient facilement par l'action du régulateur, ainsi que nous allons le voir en étudiant la figure 101, qui représente l'ensemble de la transmission entre l'arbre de couche et les distributeurs.

Sur l'arbre L est calé un excentrique M, qui, par l'intermédiaire de la barre MN et d'une suite de tiges et de leviers, imprime à l'écrevisse O un mouvement d'oscillation. Ce mouvement est transmis, par le système ordinaire, aux distributeurs d'échappement, il est également communiqué, par des tiges, de cette écrevisse aux boutons F et F' qui commandent l'admission. Le mouvement d'oscillation du point H (de la fig. 99) est obtenu de la manière suivante : la tige K, articulée en H, se pour-

suit jusqu'au levier *TQ* (fig. 100), oscillant autour du point fixe *Q*, sous l'action du lien *RS*, relié en *S* à la barre d'excentrique. Il résulte de cette disposition que les points *N* et *R*, reliés à une même barre d'excentrique *NM*, décrivant des trajectoires à peu près normales l'une à l'autre, leurs points morts sont alternants; les oscillations des points *F* et *K* sont donc également alternantes, ce qui répond aux conditions précédemment énoncées. Les tiges *K* et *K'* se rattachent, non pas directement au point *T*, mais aux extrémités d'un court levier *PP'*, articulé en *T*, et dont l'inclinaison est réglée par la position du régulateur centrifuge, à l'aide du bras *TU* et du lien *UV*. On voit, sur la figure, comment s'exerce l'action du régulateur et comment il fait varier l'admission.

Si l'on étudie d'un peu près la distribution Frikart, on lui reconnaît certains avantages sérieux : l'admission peut être poussée plus loin qu'avec les commandes à contact, telles que les Farcot et Corliss; l'avance à l'admission peut être, suivant la taille des touches, rendue dépendante ou indépendante de la durée de l'admission; par contre, le régulateur est moins libre que dans les distributions par déclenchement ordinaires.

A l'Exposition, la distribution Frikart était appliquée sur les machines exposées par la maison Escher, Wyss et Cie, par la Société alsacienne et par M. de Villechâtel; ces machines, fort belles d'ailleurs et dignes d'une étude sérieuse, étaient à plusieurs cylindres en cascade; nous les décrirons en même temps que les autres machines à double expansion.

Dans la plupart des machines à détente par déclenchement, les obturateurs d'admission sont, soit des tiroirs tournants, du genre Corliss, soit des soupapes équilibrées. Il y a, pour ce choix presque unanime, une raison sérieuse : c'est que, dans la détente par déclenchement, la fermeture des distributeurs doit se faire très brusquement, sous l'action d'une force extérieure qui ne soit pas excessive; il faut donc que le distributeur offre peu de résistance au mouvement, tout en conservant une bonne étanchéité, et les deux genres de distributeurs que nous venons de rappeler satisfont bien à cette double condition.

Néanmoins quelques essais ont été faits pour adapter le déclenchement aux tiroirs glissant sur glace plane. Dans cet ordre d'idées, il convient de citer la machine exposée par MM. Émile et Jules Halot et Cie (ancien établissement Cail, Halot et Cie), de Bruxelles. Cette machine est sans condensation; le cylindre a 0 m. 320 de diamètre; la course est de 0 m. 700; à la vitesse de 55 tours par minute, la puissance est d'environ 20 chevaux. La distribution est du système Zimmermann et Waldmann.

La maison Brown (C. H.) et Cie, de Pitschburg (Mass.) [États-Unis], présente également une machine horizontale, dont la distribution est opérée par quatre tiroirs plats, avec commande par déclenchement des deux tiroirs d'admission. Avec un cylindre de 0 m. 350 sur 0 m. 950 et à 75 tours à la minute, cette machine fait à peu près 100 che-

vaux. Elle est d'ailleurs remarquable par sa belle construction et ses dispositions bien entendues.

Parmi les machines de la catégorie qui nous occupe, une des plus intéressantes est sans contredit celle exposée par la Compagnie de Fives-Lille (Nord). Elle est monocylindrique, horizontale, à condensation et à détente variable par le régulateur.

Diamètre du cylindre	550 millim.
Course du piston	1,100

A la vitesse de 50 tours par minute, admission au 1/10 et pression à l'admission de 5 kilogr., elle donne 115 chevaux indiqués.

La distribution est opérée par deux lumières d'admission, placées sur le côté, et deux lumières d'échappement, placées au-dessous du cylindre; ces lumières sont courtes et les espaces nuisibles sont faibles. Les distributeurs sont à jalousie; les glaces d'admission sont percées de deux ouvertures, celles d'échappement de quatre ouvertures. La commande des tiroirs d'échappement est desmodromique; celle des tiroirs d'admission comporte un déclenchement, gouverné par le régulateur; le rappel à la fermeture est obtenu par des ressorts en boudin, renfermés dans des cylindres avec dash-pot.

L'exécution est de premier ordre; les pièces de la transmission sont en acier; les proportions de tous les organes et tous les détails sont très étudiés. Cette machine fait honneur au grand atelier de construction qui l'a établie.

Signalons encore la machine exposée par la Société anonyme verviétoise pour la construction de machines (ancienne maison Houget et Teston), à Verviers (Belgique); la distribution est opérée par des tiroirs plats, avec commande par déclenchement, du système Bède.

M. Hoyois (Alfred), ingénieur à Clabecq, près Tubize (Belgique), présente une machine dont la distribution est fort originale. Cette machine est horizontale; son cylindre a 0 m. 500 de diamètre et 1 mètre de course; la puissance est d'environ 80 chevaux en allure normale. Les distributeurs d'admission sont deux soupapes placées sur les fonds dans l'axe du cylindre; elles se meuvent dans des boîtes formant enveloppes de vapeur des fonds, et sont commandées par un système à déclenchement. Les distributeurs d'échappement sont deux tiroirs à grille, placés dans le bas du cylindre et attaqués par la crosse du piston.

MM. Jean et Peyrusson, constructeurs à Lille, exposent une machine horizontale à condensation dont les dimensions principales sont données ci-après :

Diamètre du cylindre		350 millim.
Course du piston		900 —
Nombre de tours par minute	75 à	80
Puissance	55 à	80 chev^x^.

La distribution est opérée par quatre tiroirs plans.

Les deux tiroirs d'admission sont à simple lumière; chacun de ces tiroirs est mû par un excentrique spécial et commandé par une transmission à déclenchement sous l'action du régulateur centrifuge; le rappel est obtenu par des pistons à vide formant dash-pot.

Les deux tiroirs d'échappement sont à grille; leur commande est assez originale: la crosse du piston est munie d'un doigt qui, vers les extrémités de la course, vient en contact avec des galets, dont le mouvement, par un système de leviers et de tiges, est transmis aux distributeurs; ce dispositif rappelle celui présenté par M. Walschaërts à l'Exposition de 1878.

La machine exposée par MM. Jean et Peyrusson est fort bien exécutée et les détails sont tout à fait soignés.

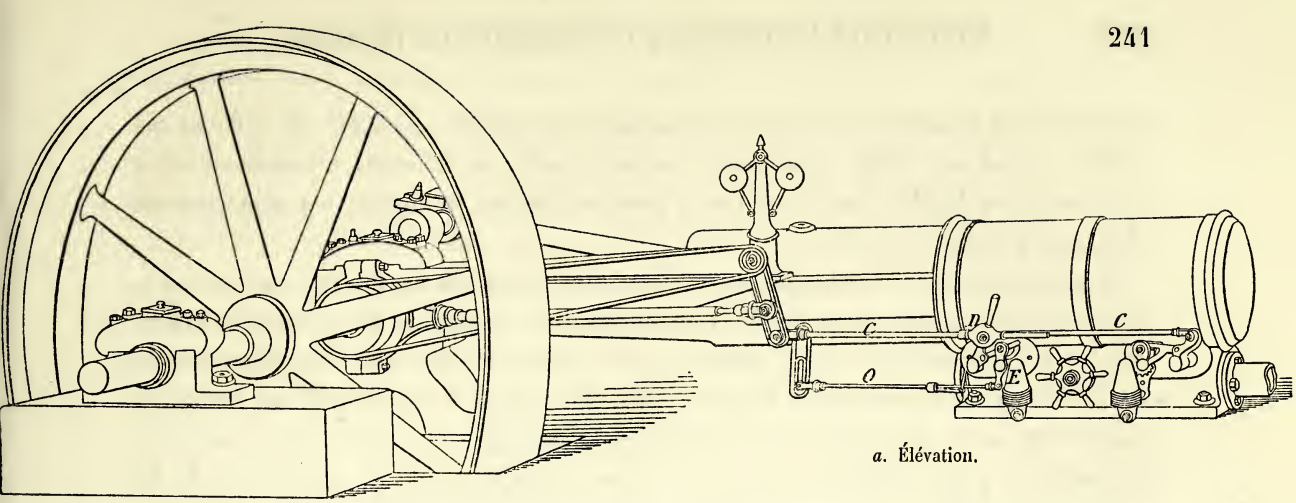
Nous arrivons aux machines dont la distribution comporte seulement deux lumières, avec commande par déclenchement. Dans les machines de cette catégorie, chaque lumière sert successivement à l'admission et à l'échappement, comme dans les distributions ordinaires par tiroir en coquille.

L'un des types les plus répandus est celui imaginé par Gérôme Wheelock; il figurait déjà à l'Exposition de 1878, où il obtint le plus légitime succès; il en a été construit un grand nombre d'exemplaires, tant en Europe qu'en Amérique; l'Exposition de 1889 en présentait plusieurs spécimens, soit du type original soit du type modifié en 1885.

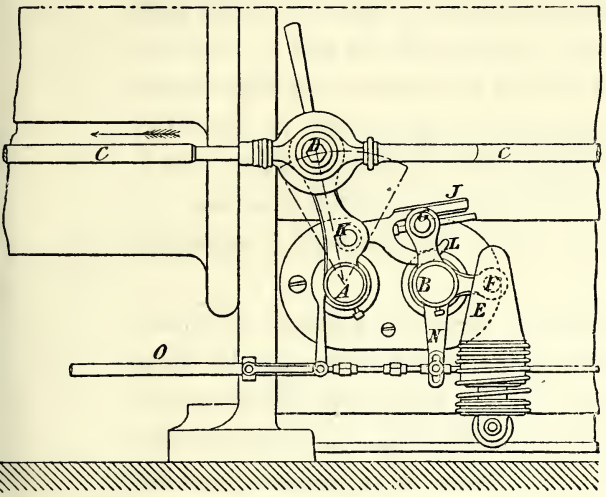
Le type de 1878 est représenté fig. 102. On est frappé, à l'inspection de la figure, de la grande simplicité d'aspect que présente cette machine; cette simplicité est réelle et n'est nullement rachetée par des complications intérieures; en fait, la machine Wheelock se prête à une construction économique, et son entretien n'est ni dispendieux ni difficile; ces qualités sont dues, non seulement à l'agencement général, mais aussi aux dispositions de détail, qui sont étudiées conformément aux règles d'une bonne et saine construction.

Jetons d'abord un coup d'œil sur la coupe des distributeurs (fig. 102 *c*). La distribution est opérée par deux obturateurs superposés: l'obturateur de distribution naturelle *A*, lequel sert successivement à produire l'admission et l'échappement, et l'obturateur de détente *B*. Ces deux obturateurs sont cylindriques, comme des tiroirs Corliss, mais, à cela près, ils fonctionnent comme des tiroirs plans ordinaires. L'obturateur *A* admet par sa lèvre extérieure *a* et échappe par sa lèvre intérieure *b*, laquelle est suivie d'un creux *c* comme dans un tiroir en coquille; il est manœuvré directement par l'excentrique, ainsi qu'on le verra ci-après. Le distributeur de détente *B* est à double admission, comme on le voit sur la figure, où il est représenté ouvert; il travaille dans une chambre spéciale; il est également manœuvré par l'excentrique de distribution, mais avec l'intermédiaire d'un appareil de déclenchement.

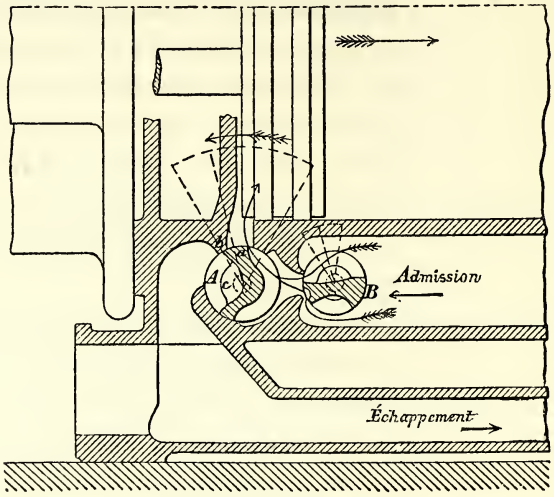
Ces indications sommaires suffisent pour faire comprendre l'économie du système: il s'agit, au fond, d'une détente par obturation de l'arrivée de vapeur, comportant les



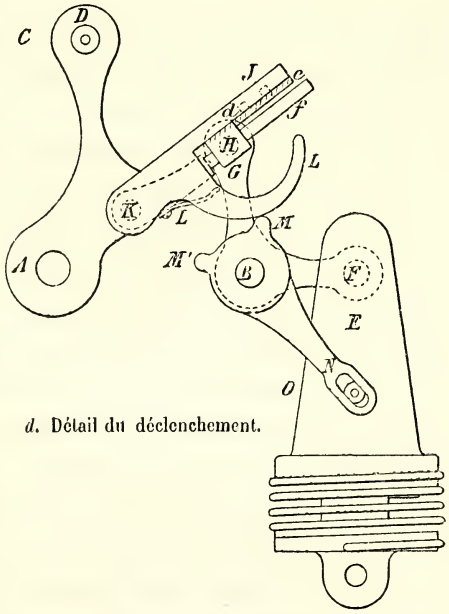
a. Élévation.



b. Commande de la distribution.



c. Coupe des distributeurs.



d. Détail du déclenchement.

Fig. 102. — Machine Wheelock, modèle de 1878.

IMPRIMERIE NATIONALE.

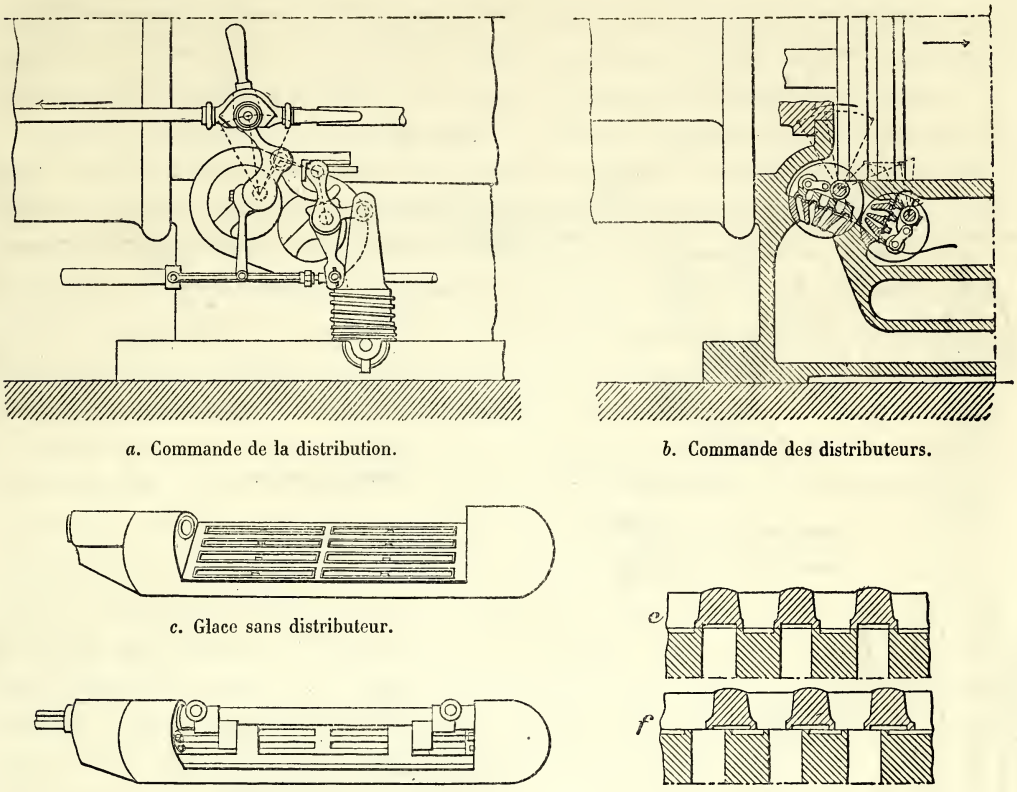
propriétés de ce mode de distribution; parmi ces propriétés, il en est une qui, au cas actuel, prend une réelle importance : le distributeur de détente, au moment où il manœuvre, se déplace dans un milieu à pression presque uniforme; ces déplacements deviennent ainsi très faciles.

Le mécanisme de commande est indiqué clairement sur les figures 102 *a*, *b* et *c*. L'excentrique agit sur la tringle *CC*; celle-ci, par *DA*, commande directement le distributeur *A*. Le distributeur *B* est sollicité par le poids *E*, additionné d'un léger ressort en spirale, par l'intermédiaire du levier *FBG*. Sur le bras *G* de ce levier est monté un cube *H* en acier, dont l'arête vient s'enclencher en *d* avec la tranche de la touche *de*; ce cube est percé d'un trou à travers lequel passe le guide *ff*, articulé en *K*. La touche *de* est fixée sur une pièce *JKL*, articulée en *K* sur le levier *AD*, et qui porte un doigt recourbé *LL*; c'est le contact de ce doigt avec la saillie *M* qui, en soulevant *JK*, détermine le déclenchement en *d*. La saillie *M* fait elle-même partie d'un anneau qui peut tourner autour de *B* sous l'action du régulateur, agissant par la tige *ON* et le levier *NB*. Une autre saillie *M'*, venue sur le même anneau, vient se placer sous le doigt *LL* lorsque le régulateur tombe au bas de sa course, et empêche ainsi toute admission de vapeur; ainsi la machine s'arrête si la courroie qui commande le régulateur vient à manquer.

Tout cet ensemble est fort ingénieux; l'aspect de la machine est simple et le fonctionnement doux et régulier. Les détails de la construction ont été étudiés par M. Wheelock avec un soin minutieux et comportent des dispositifs fort intéressants. Rappelons que la machine Wheelock a remporté une grande médaille à l'Exposition de 1878. Elle était présentée à l'Exposition de 1889 par M. de Quillacq, d'Anzin, et M. Brasseur, de Lille.

M. de Quillacq s'est plus particulièrement attaché à la construction d'un modèle nouveau imaginé par M. Wheelock en 1885 (fig. 103 *abcdef*). La différence capitale, c'est la substitution aux distributeurs tournants de tiroirs plats à jalousie. Le mode de fonctionnement de ces distributeurs n'est pas non plus le même que dans le type primitif : au lieu d'être superposés, les distributeurs d'admission et d'échappement agissent indépendamment l'un de l'autre, et viennent simplement aboutir à une même lumière; l'auteur s'est ainsi rapproché du dispositif Corliss à quatre lumières. Quant à la transmission, elle n'a pas sensiblement changé. La figure 102 ci-jointe est assez explicite pour qu'il soit inutile d'insister. M. Wheelock a eu l'heureuse idée de constituer la glace par un bloc de métal, formant joint cru sur la fonte du cylindre, et que l'on peut facilement soit retirer pour la visite, soit remettre en place; le joint est conique et un léger forcement suffit pour le rendre étanche.

La machine Wheelock (modèle de 1878) exposée par M. Brasseur, de Lille, avait un cylindre de 0 m. 457 sur 1 m. 067 et développait 110 chevaux environ, à la vitesse de 54 tours. M. Brasseur exposait également une machine Wheelock à deux cylindres compound. L'exécution de ces deux machines était irréprochable.



a. Commande de la distribution.

b. Commande des distributeurs.

c. Glace sans distributeur.

d. Glace avec son distributeur.

e, f. Détails des tiroirs.

Fig. 103. — Machine Wheelock, modèle 1885. M. de Quillacq, d'Anzin, constructeur.

M. de Quillacq, d'Anzin, avait installé de son côté :

1° Dans la galerie des Machines, une machine compound de 300 chevaux;

2° Dans le pilier sud de la tour Eiffel, deux machines avec pompes, d'une puissance de 150 chevaux chacune, fournissant l'eau aux ascenseurs de la tour;

3° Sur la berge, une machine de 100 chevaux, actionnant des pompes pour le service des eaux de l'Exposition.

Ces machines étaient du type de 1885 et remarquablement exécutées.

La maison Dyckhoff, de Bar-le-Duc, avait construit et exposé une machine à vapeur à laquelle était appliqué un système de distribution fort ingénieux, imaginé par M. l'ingénieur Stoppani. Cet inventeur s'est donné comme but de faire la distribution, à chaque bout du cylindre, par une seule lumière et un obturateur unique, mû par déclenchement et faisant communiquer successivement la lumière avec l'admission et avec l'échappement. La combinaison à laquelle l'ont conduit ces données est simple et originale; elle est représentée par les figures 104 et 105 ci-après.

Deux distributeurs tournants, disposés aux deux extrémités et au-dessous du cylindre, oscillent autour des axes A et A', sous l'action de la barre d'excentrique BBB'.

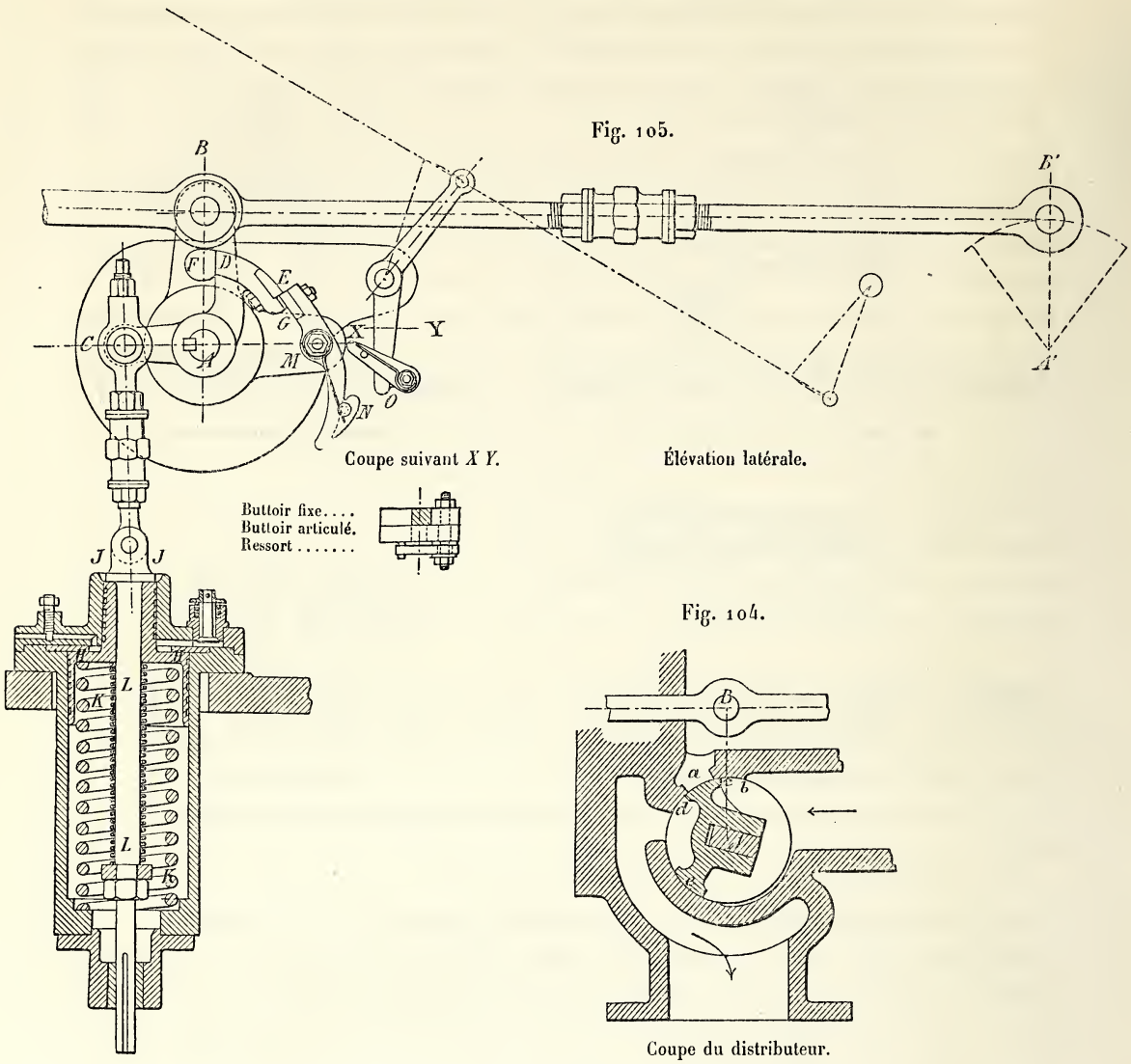


Fig. 104 et 105. — Machine Dyckhoff. — Distribution Stoppani.

La figure 104 représente en coupe le distributeur d'avant et sa commande en élévation. La lumière *a* (voir la coupe) qui dessert le cylindre s'ouvre sur une glace cylindrique *bcde*, sur laquelle s'appliquent les barrettes *dc* et *e* du distributeur oscillant *A*. La barrette *e* ne sert qu'à séparer l'admission de l'échappement. La barrette *cd* fait la distribution; elle admet la vapeur par la lèvre *c* et échappe par la lèvre *d*. Supposons le piston vers son point mort de droite : le levier *AB* étant alors dans sa position moyenne, représentée sur la figure 104 *B*, est entraîné vers la droite par l'excentrique; l'échappement s'ouvre, puis le levier achève son excursion, revient vers la gauche, et l'échappement se ferme; un peu plus tard, le point *c* dépassant la lèvre droite de la lumière *a*, l'admission s'ouvre. Jusqu'ici la distribution ne diffère pas de celle obtenue par un tiroir en coquille

ordinaire conduit par un excentrique; mais à un certain moment, le déclenchement se produit, le distributeur est vivement ramené en tournant vers la droite et reprend la position représentée sur la figure, la barrette *cd* fermant la lumière d'admission.

On voit, d'après cette description, que ce mode de fonctionnement diffère par un point important du jeu ordinaire des appareils à déclic : dans les machines Corliss, Sulzer ou autres, le distributeur, ramené par le déclenchement à sa position de fermeture, est ensuite repris par la transmission et éloigné de cette position *toujours dans le même sens;* ici, il en est tout autrement : le distributeur *oscille de part et d'autre* de la position de fermeture, dans laquelle il reste immobile pendant la durée de la détente. A cette condition nouvelle, qui constitue l'originalité du système, il a été satisfait à l'aide d'un mécanisme fort ingénieux que nous allons décrire.

Jetons un coup d'œil sur la figure 105, qui représente l'élévation de la transmission et la coupe du ressort de rappel. Le distributeur est solidaire du levier coudé *CADE*; en *C* s'exerce l'action du ressort de rappel; le toc *DE* est saisi entre deux contacts : l'un permanent *F*, l'autre à déclenchement *G*, dont nous étudierons plus bas le mode d'action. Le distributeur oscillant de part et d'autre de la position de fermeture, le ressort de rappel doit permettre ce mouvement, et cependant tendre toujours à ramener à cette position. La figure représente l'appareil dans cette situation : le piston *HH* du dash-pot appuie sur le fond du cylindre, en même temps que l'embase *JJ* de la tige appuie sur la tête du piston; ce double appui est obtenu à l'aide des deux ressorts à boudin *KK* et *LL*, le premier agissant sur le piston, l'autre sur la tige. On voit que, par l'action de ces deux ressorts opposés, le distributeur, abandonné à lui-même, se trouve ramené à la fermeture, et qu'il peut cependant osciller de part et d'autre de cette position, en faisant fléchir l'un ou l'autre des deux ressorts.

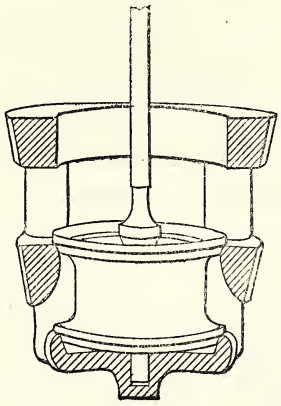
Le reste de l'appareil se comprend facilement sur la figure : le bras *AB*, entraîné par l'excentrique, est fou sur la douille qui entoure l'axe du distributeur; il porte d'une part le contact fixe *F*, qui pousse le toc vers la droite, d'autre part le contact à déclic *GMN*, qui peut basculer autour de *M* et dégager le toc, lorsque la queue *N* vient toucher la palette *O*; cette palette est elle-même commandée par le régulateur. Pour que le déclenchement puisse se produire, même dans les grandes admissions, l'auteur a appliqué un artifice que nous avons déjà eu l'occasion de décrire : la palette est munie de deux touches, l'une fixe qui sert dans les cas ordinaires, l'autre mobile et maintenue par un léger ressort; celle-ci n'entre en jeu que lorsque le déclenchement n'a pas eu lieu dans la première moitié de la course du piston. Par ce procédé, on a pu faire varier l'admission dans des limites fort étendues, allant de 0 à 0.78 de la course pour la machine exposée.

Le système imaginé par M. Stoppani, et très bien réalisé par M. Dyckhoff, est fort ingénieusement combiné et méritait d'être étudié avec quelque détail. Il a soulevé plusieurs critiques : on reproche au distributeur, qui se meut sous pression, d'engendrer des frottements et d'être lourd à manœuvrer. La pratique de ce système tout nouveau permettra de juger la question.

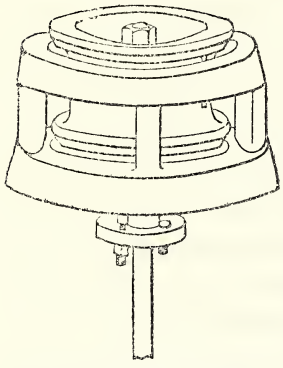
A propos de ce système de distribution, il a été soulevé devant le jury une question de priorité : on contestait la nouveauté du système. Le jury est resté fidèle à sa jurisprudence constante, à savoir : que le jugement des questions de priorité ne rentrait pas dans ses attributions; au cas particulier, cette décision était d'autant mieux justifiée que le réclamant ne s'appuyait sur aucun objet figurant à l'Exposition.

A la suite des distributeurs plans ou cylindriques, il convient d'étudier les soupapes, et en particulier les soupapes à deux sièges. Leur origine est fort ancienne. Elles sont presque contemporaines des premières machines à vapeur; elles constituaient l'organe de distribution préféré pour les puissantes machines à simple effet employées dans l'épuisement des eaux des mines. Toutefois, en dehors de cette application spéciale, l'usage des soupapes équilibrées s'était peu répandu.

C'est aux constructeurs suisses, et en particulier aux FRÈRES SULZER, de Winterthur, que revient l'honneur d'avoir rappelé l'attention sur la soupape équilibrée, comme organe de distribution de vapeur. Cette maison, aujourd'hui une des plus célèbres parmi les constructeurs modernes, a eu des débuts fort modestes. Elle fut fondée en 1834, et occupait alors douze ouvriers; pendant longtemps, elle fournit uniquement ses produits à l'industrie suisse. Les ateliers se développèrent lentement; leur réputation ne s'était pas encore répandue au dehors, lorsque, en 1867, à l'Exposition universelle de Paris, les frères Sulzer présentèrent une machine d'un type entièrement original, d'une construction remarquable, qui frappa vivement l'attention des visiteurs : c'était la machine à soupapes équilibrées, avec commande par déclenchement; la maison obtint, pour cette machine, une médaille d'or. Immédiatement les commandes affluèrent, les licences furent demandées, et la maison prit un rapide essor. Ces beaux succès furent confirmés à l'Exposition de 1878, où figuraient plusieurs machines du type en question, de construction suisse, française ou étrangère, et où la maison Sulzer obtint un grand prix. Au commencement de 1889, les frères Sulzer avaient livré plus de 1,200 machines à soupapes, représentant environ 100,000 chevaux de puissance.



Soupape d'admission Sulzer.



Soupape d'échappement Sulzer.

Fig. 106.

C'est du bon fonctionnement de la soupape à double siège que dépend la valeur des machines que nous étudions. Cet organe est délicat; le moindre défaut d'ajustage, la moindre inégalité dans les dilatations suffisent pour en compromettre l'étanchéité. MM. Sulzer ont étudié avec le plus grand soin cet organe essentiel, et, à la suite de longues re-

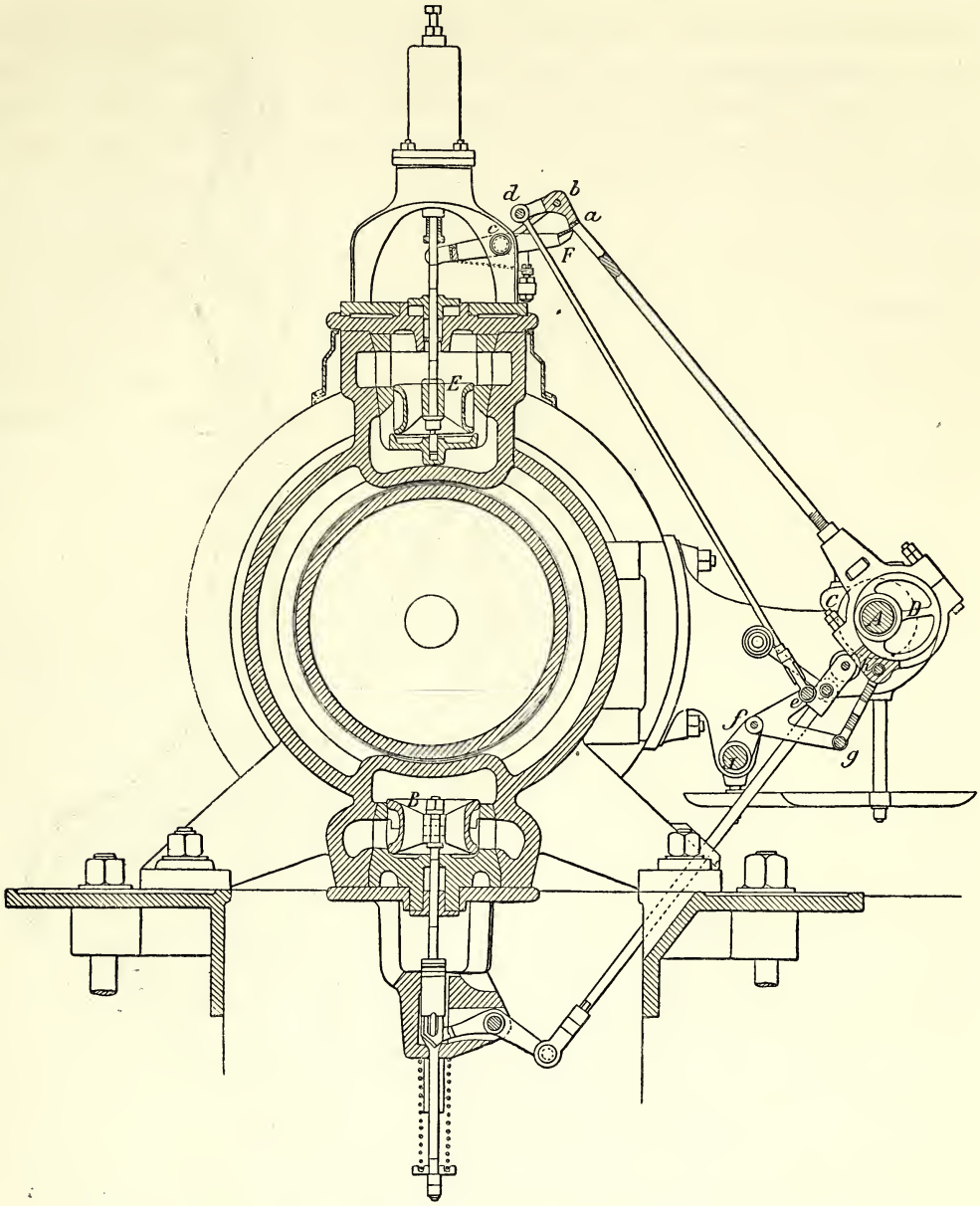


Fig. 107. — Machine compound de Sulzer frères. — Distribution au cylindre admetteur.

cherches, ils sont parvenus à l'établir d'une manière irréprochable. La soupape Sulzer est parfaitement étanche, légère à manœuvrer, et, moyennant un entretien fort simple, elle conserve presque indéfiniment ses qualités initiales. Elle est (fig. 106) en fonte spéciale, de grain fin et dur; le siège est venu de la même coulée que l'organe mobile; ce siège est réuni par simple forcement à cru, sur les parties fixes de la machine, au moyen d'un double joint conique.

Quant à la commande, elle a reçu successivement différentes dispositions. La figure 107 représente la distribution au cylindre admetteur d'une machine compound

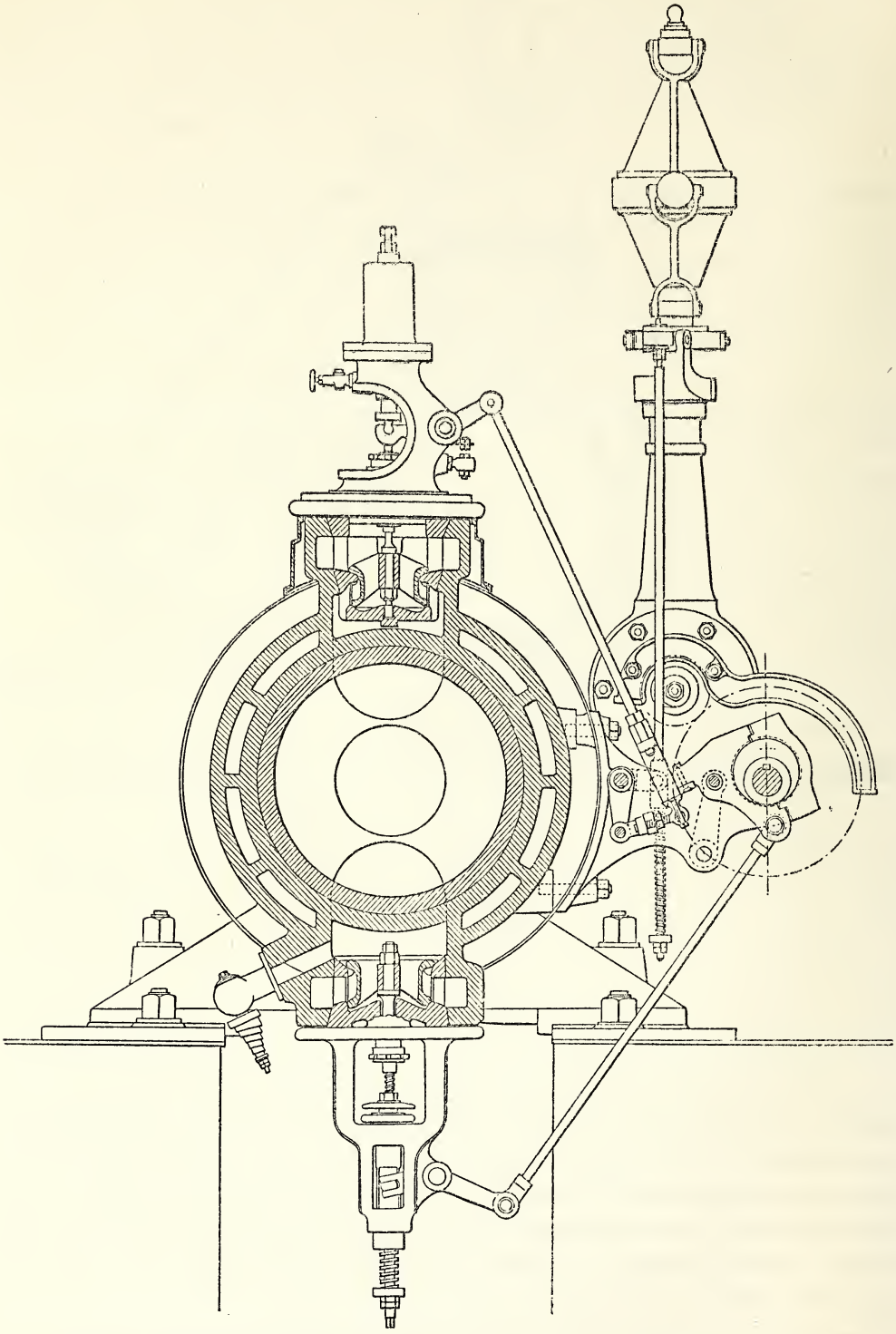


Fig. 108. — Machine compound Carels frères, de Gand. — Distribution au petit cylindre.

exposée par MM. Sulzer dans le Palais des Machines; c'est une coupe transversale au cylindre, passant par une des paires de lumières. L'arbre de distribution *A*, parallèle à l'axe de la machine, reçoit de l'arbre de couche, au moyen d'une paire de roues d'angle égales, un mouvement de rotation de vitesse égale à celle de l'arbre de couche. La soupape d'échappement *B* est commandée par l'excentrique à onde *C* calé sur l'arbre *A*. Sur le même arbre est monté l'excentrique circulaire *D*; celui-ci actionne la soupape d'admission *E* au moyen d'une transmission à déclenchement, qui agit à l'extrémité *F* du levier de cette soupape, par la touche *a*, oscillant autour de *b*; l'articulation *b*, portée par la bielle d'excentrique *Db*, est reliée au point fixe *c*; l'oscillation de la touche est obtenue par le système articulé *bdefgh*; le mouvement est pris en *h* sur le collier de l'excentrique *D*, et transmis à l'aide du levier coudé *gfe*, oscillant autour de *f*; quant au point *f*, il est solidaire de l'arbre *j*, qui peut tourner autour de son axe, sous l'action du régulateur.

Voici, à titre d'autre exemple (fig. 108), la distribution au petit cylindre d'une fort belle machine compound exposée par MM. Carels frères, de Gand; c'est une variété du système de commande que nous venons de décrire; les explications dans lesquelles nous sommes entré rendront cette figure facile à lire.

MM. Sulzer se sont attachés avec persévérance à perfectionner le type primitif, qui leur avait procuré de si légitimes succès. Grâce à des recherches attentives, grâce aux soins de toute nature apportés à la construction, grâce à l'application sur la plus large échelle de la méthode d'essai calorimétrique et dynamométrique inaugurée par G.-A. Hirn, ils sont parvenus à améliorer d'année en année les machines qu'ils livrent à l'industrie, à en assurer la régularité de marche et la durabilité, à en réduire la consommation. Les résultats réalisés à ce dernier point de vue sont des plus remarquables; la consommation de vapeur, par heure et par cheval indiqué, est descendue dans certaines applications au-dessous de 5 kilogr. 5. Il est vrai que ce chiffre extrêmement réduit a été obtenu sur une machine à triple expansion. D'ailleurs, dans ces dernières années, c'est vers l'étude de la détente multiple que se sont tournés les efforts de MM. Sulzer : leur exposition ne comportait aucune machine monocylindrique. Nous retrouverons cette maison lorsque nous nous occuperons des machines Woolf et compound.

La Société anonyme des ateliers de construction de la Meuse, à Liège (Belgique), expose une fort belle machine horizontale, avec distribution par soupapes équilibrées. Cette distribution est du système Timmermans; la commande des soupapes est faite, non plus par un arbre latéral mû par engrenages, mais par un dispositif assez analogue à certaines transmissions Corliss. Un excentrique donne le mouvement à un plateau oscillant, qui, à l'aide de biellettes, agit sur les quatre distributeurs avec déclenchement pour la commande de l'admission.

Cette machine présente quelques dispositifs originaux : le régulateur est commandé, non plus par courroie ou engrenage, mais par une poulie de friction, ce qui permet

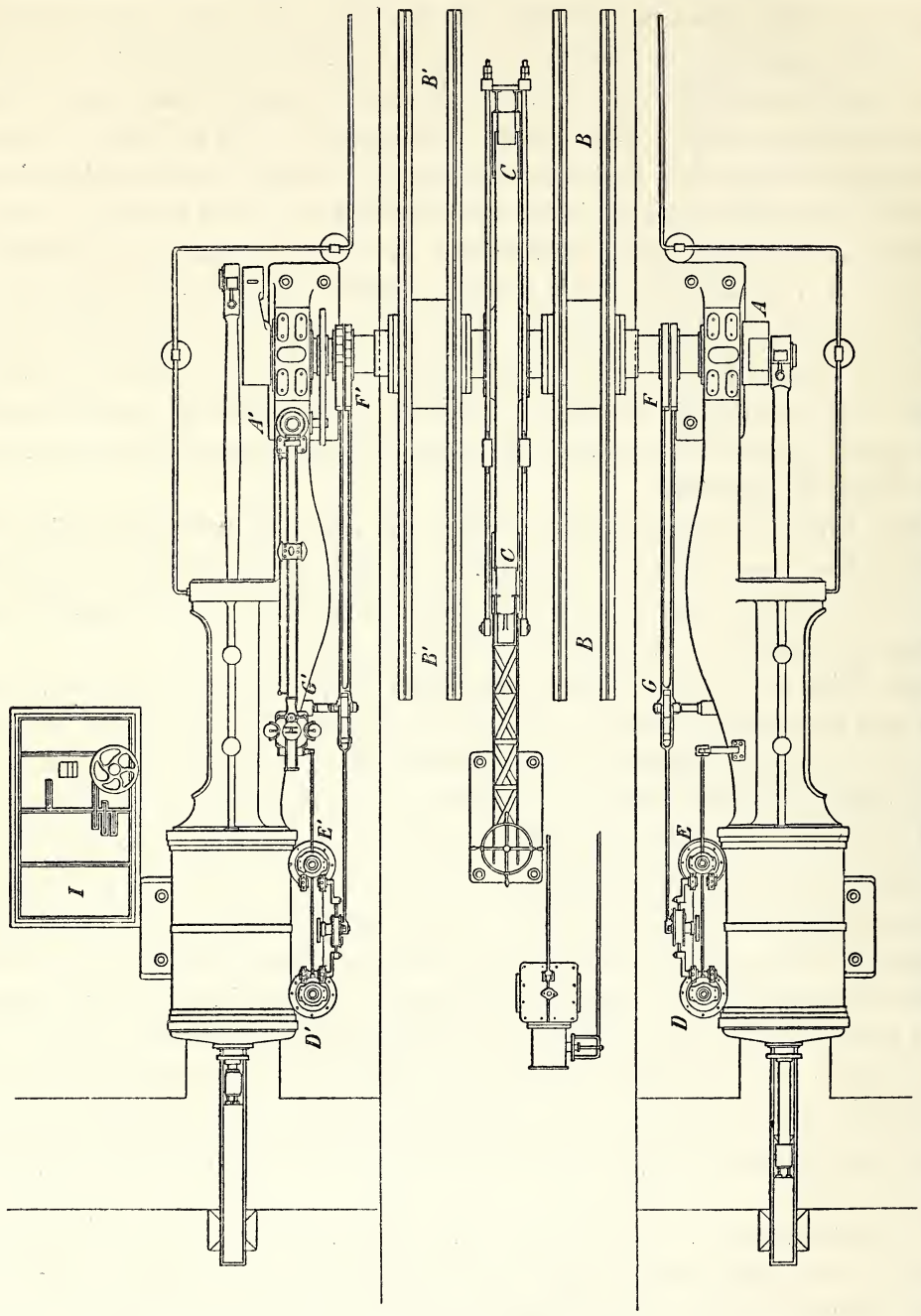


Fig. 109. — Machine de la Société anonyme Marcinelle et Couillet. — Plan.

de faire varier dans des limites étendues la vitesse de la marche, sans arrêter la machine. Cette construction, très belle et bien entendue, fait honneur à la Société de la Meuse.

Il est arrivé, dans quelques cas, que le jury de la classe 52 a dû consentir des sacrifices qui n'ont pas laissé que d'être pénibles. C'est ainsi que la magnifique machine à

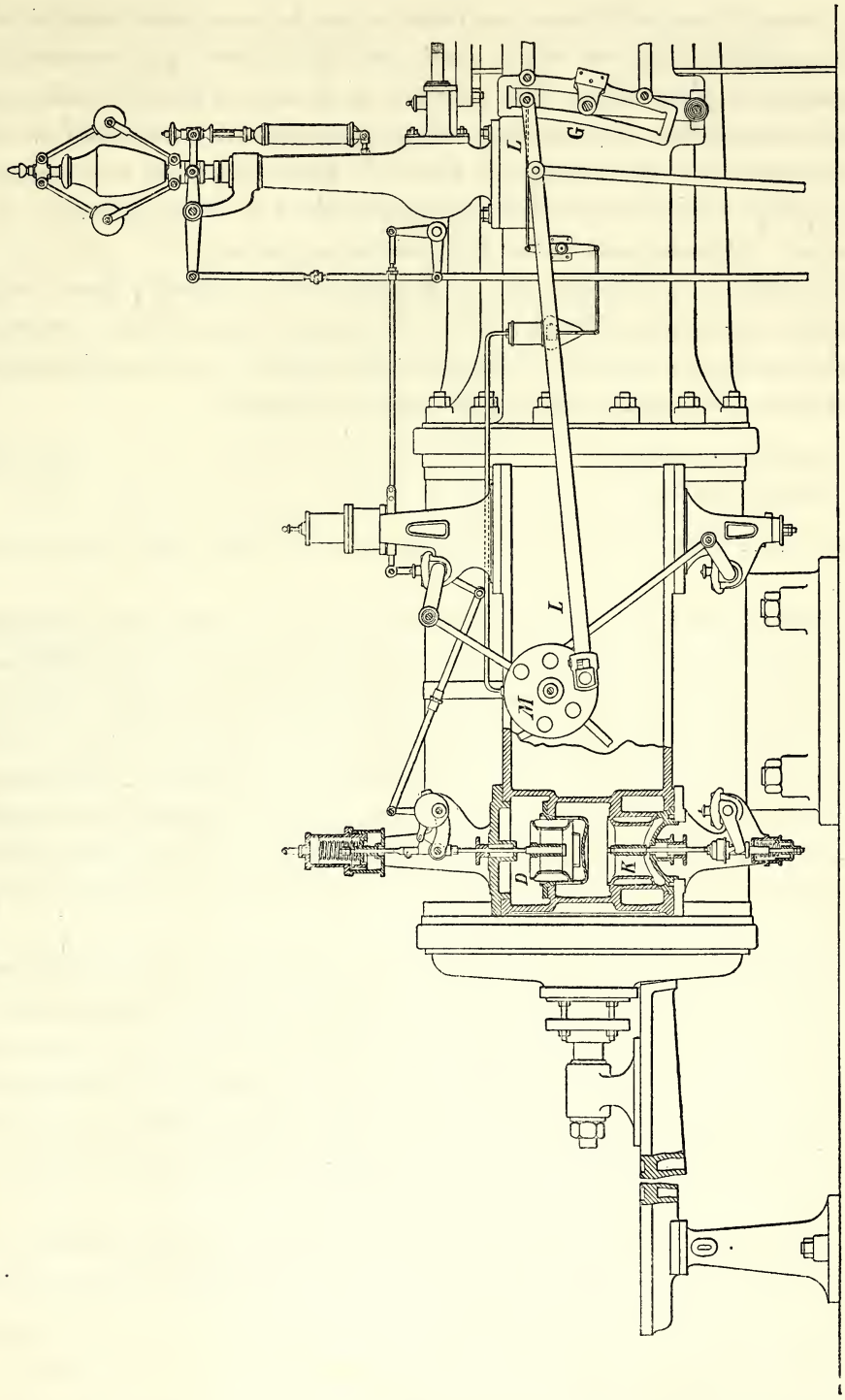


Fig. 110. — Machine de la Société anonyme Marcinelle et Couillet. — Distribution.

vapeur exposée par la Société anonyme de Marcinelle et Couillet, à Couillet (Belgique), quoique inscrite dans le catalogue à la classe 52, a dû être déclassée et renvoyée à un autre jury. C'est en effet une machine d'extraction, spécialement destinée au service des

mines, présentée avec ses bobines, ses freins et tous les accessoires caractérisant son affectation spéciale. C'est avec regret que le jury de la classe a pris une décision que lui imposaient sa jurisprudence et la nature de son mandat; il eût pris plaisir à étudier cette belle construction, et à décerner une récompense élevée à ceux qui l'ont établie. Nous ne sommes pas, dans ce rapport, tenus à la même réserve, et nous pouvons décrire en quelques mots cette machine, dont l'ensemble et les détails présentent un véritable intérêt, même au point de vue de la mécanique générale.

Cette machine est horizontale, sans condensation, à deux cylindres égaux, conjugués à angle droit sur le même arbre de couche; cet arbre porte deux bobines, sur lesquelles s'enroule le câble plat destiné à l'extraction de la houille jusqu'à une profondeur de 1,000 mètres. Les dimensions principales sont les suivantes :

Diamètre des cylindres	1,050 millim.
Course des pistons	1,600

Comme dans toutes les machines d'extraction, la distribution est à renversement de marche.

La figure 109 est le plan de la machine, et la figure 110 représente la distribution.

Sur l'arbre de couche *AA'*, directement attaqué par les pistons, sont calées les deux bobines *BB* et *BB'*, ainsi que la poulie *CC* du frein. La distribution dans chaque cylindre est faite par deux paires de soupapes *DE*, *D'E'*, rejetées sur le côté et actionnées par un double excentrique *FF'*, commandant une coulisse de changement de marche *GG'*. Sur la plate-forme *I* sont groupés tous les appareils de manœuvre, savoir : le volant de prise de vapeur, la pédale du frein et les leviers commandant le changement de marche, le frein à vapeur, la valve-papillon et les robinets de purge des cylindres.

La distribution (fig. 110) est du système Lelong. Les deux soupapes d'admission *D* et d'échappement *K*, qui commandent une extrémité du cylindre, communiquent avec elle par une seule lumière; elles sont commandées par la coulisse fixe *G* au moyen de la barre de relevage *LL*, qui vient actionner le plateau oscillant *M*. Celui-ci agit directement sur les soupapes d'échappement; il commande également les soupapes d'admission à l'aide d'une transmission à déclenchement placée sous l'action du régulateur.

M. E. Windsor, de Rouen, expose plusieurs machines à double expansion, et une machine monocylindrique, que nous allons décrire. Les dimensions sont les suivantes :

Diamètre du cylindre	457 millim.
Course du piston	1,000 —
Nombre de tours par minute	70
Puissance, environ	100 chev^x.

La distribution est donnée, à l'échappement, par deux tiroirs cylindriques, à l'admission, par deux soupapes à double siège (fig. 111). Un excentrique spécial *A* com-

mande, à l'aide de la transmission *aaa*, les obturateurs d'échappement. La commande de l'admission est à déclenchement, du système Proell. On s'est préoccupé de donner aux appareils de déclenchement un groupement simple et compact. L'excentrique d'admission *B* commande le déclenchement par l'intermédiaire de la transmission *bbbc*; la dernière tige *c* de cette transmission vient agir sur un levier articulé au point fixe *C* (fig. 111) et solidaire de la potence *DD'*; celle-ci prend ainsi un mouvement d'oscillation autour de *C*. Elle se termine par deux axes *D* et *D'*, qui servent de centres d'articulation aux leviers coudés *EDF*, *E'D'F'*; ces leviers portent les touches *EE'*, qui viennent appuyer sur les queues des leviers *GJK*, *G'J'K'*, agissant sur les soupapes d'admission; l'autre bras *F* des mêmes leviers porte sur une pièce qui accompagne la douille du régulateur; il résulte de ces dispositions que le déclenchement se produira d'autant plus vite que le régulateur sera plus élevé.

Cette distribution est simple, élégante; la machine est du meilleur aspect, remarquable comme exécution, et digne en tout de la vieille et légitime réputation que s'est acquise la maison Windsor.

L'étude des appareils de distribution comporte des problèmes de cinématique nombreux et attrayants, très propres à tenter l'imagination des inventeurs. Aussi, à chaque exposition, on trouve, à côté des systèmes ordinaires et classiques, une collection de dispositifs originaux. Il en a été de même à l'Exposition de 1889. On y rencontrait un certain nombre de distributions fort différentes de celles que nous avons étudiées jusqu'ici; les unes procédant de principes à peu près nouveaux, les autres rappelant des dispositions déjà proposées. Nous allons passer en revue quelques-unes des plus intéressantes. Quant à l'ordre à suivre dans ces descriptions, il est bien difficile de l'établir rigoureux ou rationnel; nous nous efforcerons simplement de rapprocher les systèmes qui ont entre eux le plus de similitude.

Nous avons déjà eu l'occasion de citer le nom de M. Claude Bonjour, ingénieur à Paris; c'est un inventeur fertile, un esprit ingénieux et chercheur; toutes les machines construites sur ses plans, qui figuraient à l'Exposition, possèdent un caractère particulier d'originalité, surtout en ce qui concerne la distribution. Sur une machine présentée par la Compagnie des fonderies et forges de l'Horme, à Lyon (Rhône), M. Bonjour a installé une distribution commandée par pression de vapeur. Sans doute le principe n'est pas nouveau : dans un grand nombre de pompes à vapeur sans volant, le distributeur est actionné par un piston; dans beaucoup de distributions à déclenchement, l'action du ressort de rappel est remplacée par celle d'une pression. Mais l'application proposée par M. Bonjour se distingue par une analyse délicate des conditions du problème. Les appareils dont il s'agit ont parfois des ratés, occasionnés par les frottements et résistances des organes à mettre en mouvement. M. Bonjour fait agir son piston intermédiaire sur de simples tiroirs de détente fort légers et faciles à déplacer.

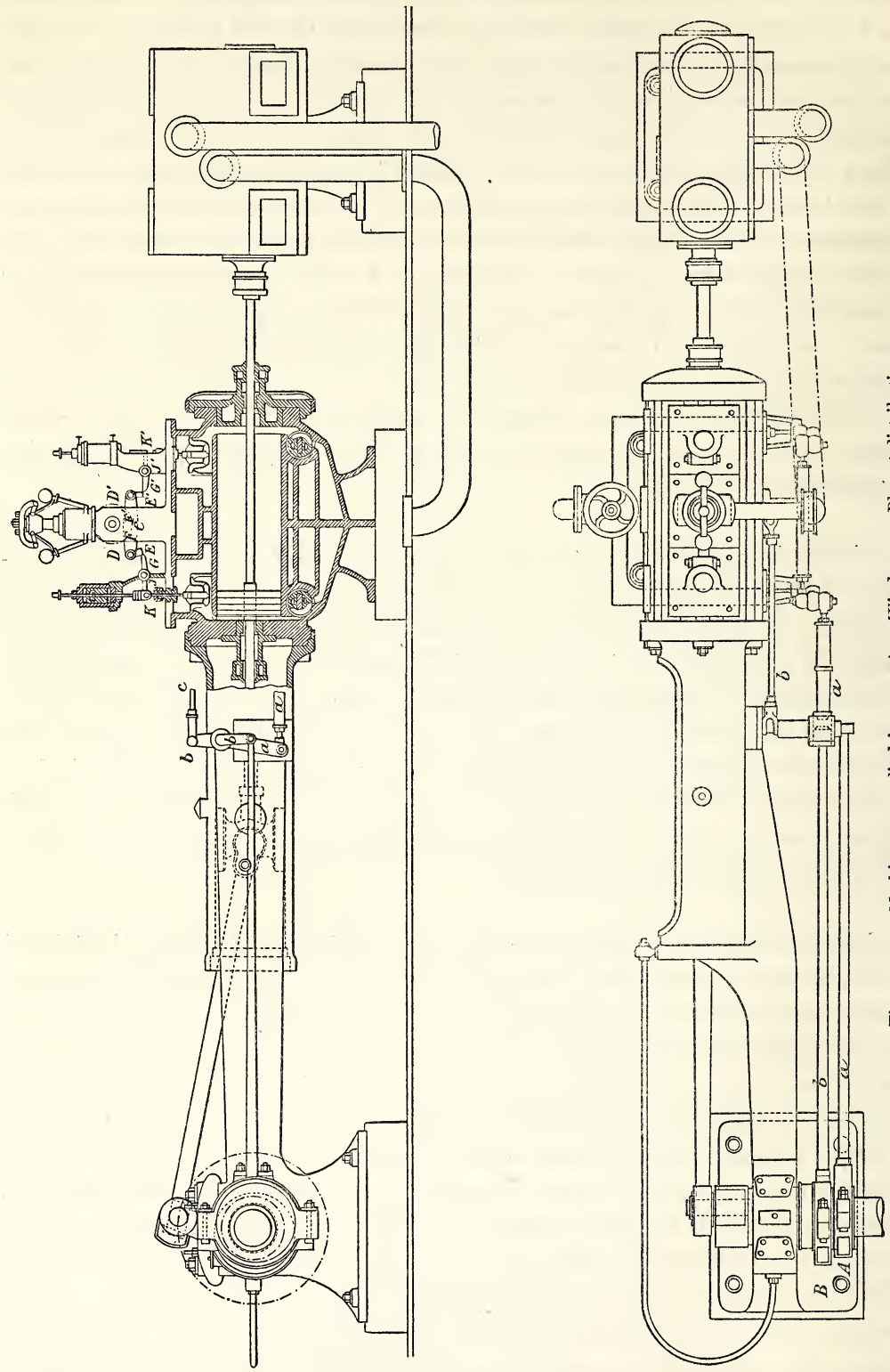


Fig. 111. — Machine monocylindrique, système Windsor. — Plan et distribution.

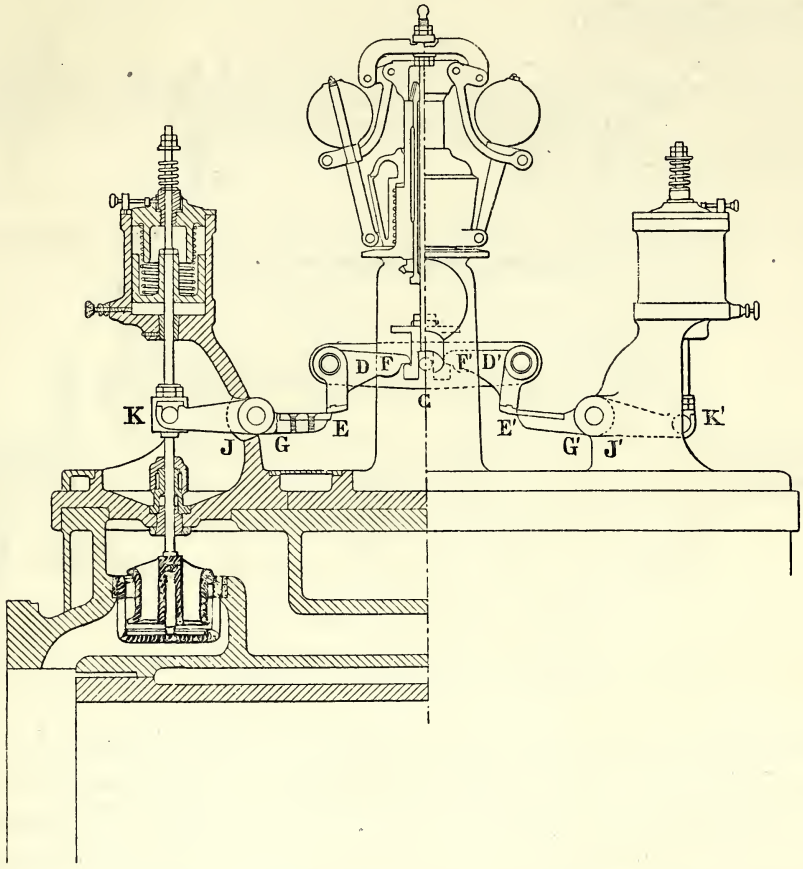
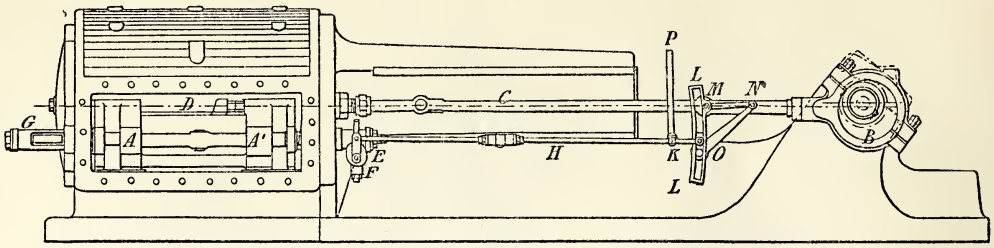
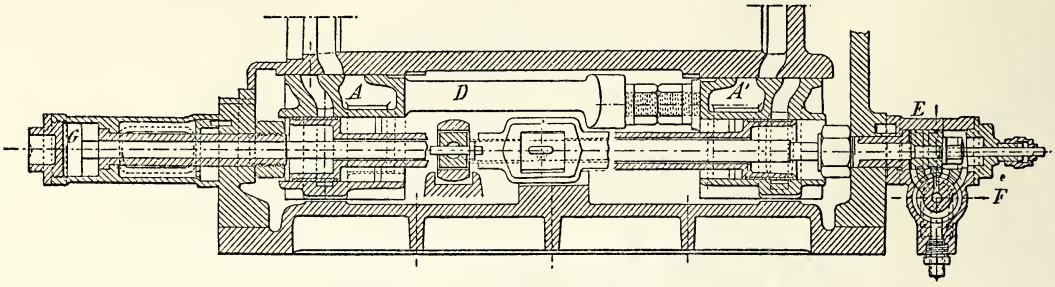


Fig. 111 *bis*. — Machine monocylindrique, système Windsor. — Détails de la distribution.

Le tiroir de la machine de l'Horme (fig. 112) est disposé comme un tiroir Meyer; il comporte deux distributeurs A, A' d'admission et d'échappement; chacun d'eux est percé d'une lumière, qui aboutit à une glace cylindrique pratiquée à l'intérieur de l'obturateur; sur cette glace se meut une tuile de détente; ces distributeurs principaux A et A' sont commandés à la façon ordinaire par un excentrique B et une bielle C; ils sont solidarisés par une tige D; les tuiles de détente ont la forme de piston; leur tige est fixée sur un petit piston à double effet circulant dans le cylindre E, et dont la distribution est opérée par le robinet F; un frein liquide G modère les mouvements du système. Le distributeur secondaire F est actionné par la bielle H, dont la tête K peut se mouvoir dans une coulisse LL; celle-ci est articulée en M sur la barre C de l'excentrique, et elle est solidaire de la potence MN, reliée au point fixe O par le lien ON. Le mouvement, assez compliqué, de la coulisse est transmis au distributeur secondaire dont les oscillations ont une amplitude qui dépend de la position du coulisseau K; cette position est sous la dépendance du régulateur, par l'intermédiaire de la tige de suspension P. Le robinet de distribution F étant tout petit, les pièces qui commandent



Élévation, la boîte à vapeur découverte.



Coupe horizontale de la boîte à vapeur.

Fig. 112. — Distribution par pression de vapeur, système Bonjour.

son mouvement, tige *H*, coulisse *LL*, etc., peuvent être très légères, et le régulateur lui-même n'a besoin que d'une puissance très faible. Les résultats sont fort remarquables : l'admission peut varier de 0 à 70 p. 100 de la course; les diagrammes présentent un angle vif au commencement de la détente, ce qui démontre la rapidité avec laquelle s'opère la fermeture de l'arrivée de vapeur.

M. Bonjour propose de nombreuses variantes de son dispositif original : en voici une assez simple (fig. 113), qui est exécutée par M. François Borssat, de Paris. Le tiroir de distribution *A* est solidaire d'un cylindre *BB'*, auquel viennent aboutir les lumières *CC'* d'admission; dans ce cylindre se meut un double piston *DD'*, qui forme obturateur des lumières *CC'*; la distribution à ce petit piston est donnée par les lumières d'admission *a* et *a'* et d'échappement *b*, *b'*; elle est opérée par le tiroir *EE'*, dans lequel sont pratiqués les orifices *dd* et *d'd'* pour l'admission et les creux *ee* et *e'e'* pour l'échappement; ce tiroir est entraîné sur le dos du tiroir principal, et le déplacement relatif résulte du contact avec la came *FF'*, laquelle est sous la dépendance du régulateur.

Signalons à titre de curiosité deux changements de marche assez curieux, applicables à de petits moteurs. Le premier, imaginé par M. Roirant et construit par M. Legal, de Nantes, est simple. Sur le trajet des lumières est interposée une fausse glace, qui peut glisser en se déplaçant sous l'action d'un levier extérieur, et prendre deux positions extrêmes; le cylindre est muni de deux tiroirs donnant, l'un la marche en avant, l'autre la marche en arrière; la fausse glace, en passant d'une position à l'autre,

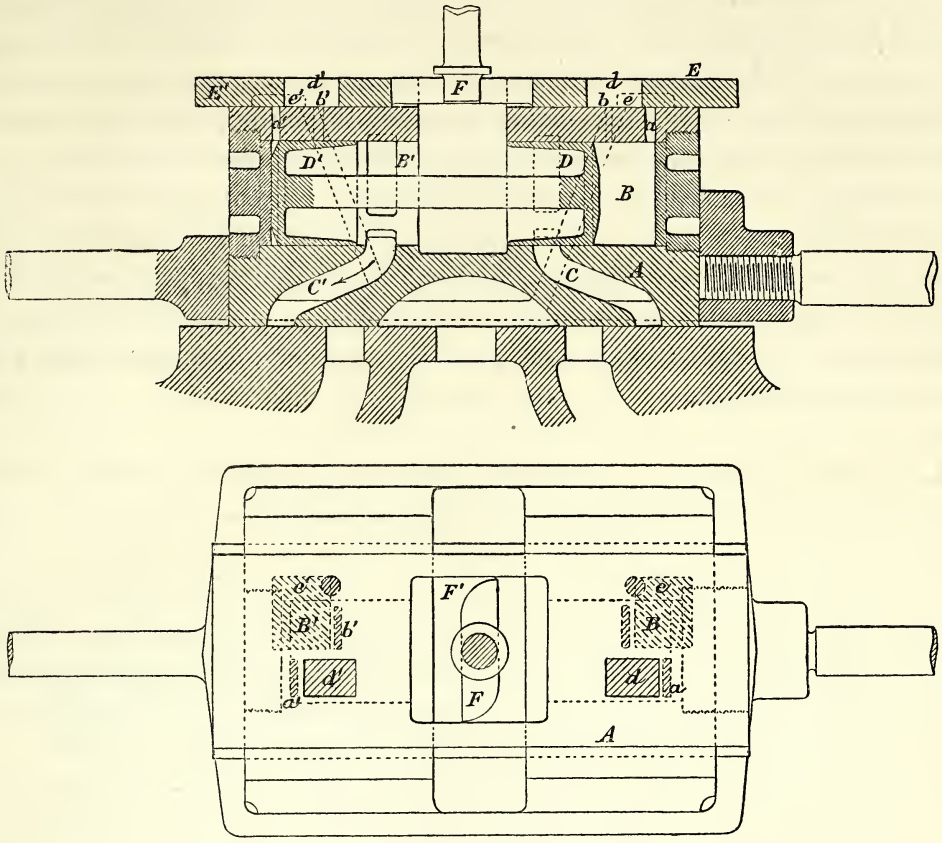


Fig. 113. — Distribution, système Bonjour. Borssat, constructeur.

couvre les lumières correspondant à l'un des tiroirs et découvre celles correspondant à l'autre; de là renversement de marche.

L'autre changement de marche, inventé par M. François Daugy, de Fourchambault (Nièvre), dérive du changement de marche à toc, autrefois usité dans la marine; un excentrique unique, fou sur l'arbre, est muni de deux tocs, correspondant aux deux sens de la marche; on le fait passer d'une position à l'autre au moyen d'un engrenage, monté sur un chariot mobile et qu'on peut mettre en prise, en agissant sur une pédale, avec une roue montée sur l'arbre de couche; cet engrenage agit, au moyen d'un plateau de friction, sur un manchon solidaire de l'excentrique.

Arrivons aux machines à distributeur rotatif. L'idée de distribuer la vapeur à l'aide d'un organe unique animé d'un mouvement de rotation continu est assurément fort séduisante, et elle a tenté un grand nombre d'inventeurs. Sans remonter au robinet à quatre voies de Denys Papin, on peut rappeler le robinet tournant de Maudslay, le disque distributeur des machines Brotherhood, etc. A l'Exposition universelle de Vienne, en 1873, on voyait une machine à vapeur avec distributeur tournant; l'invention datait

IMPRIMERIE NATIONALE.

de 1857 et elle était due à Goodrum; la machine avait été étudiée par Ehrardt et figurait dans l'exposition de la maison Kessler, de Carlsruhe; elle marchait à 300 tours par minute, et son fonctionnement a été fort satisfaisant pendant toute la durée de l'Exposition. D'autres inventeurs, parmi lesquels il faut nommer M. Conti, ont fait sur ce système des études persévérantes plus ou moins couronnées de succès.

En principe, les distributeurs rotatifs semblent bien convenir pour les machines à grande vitesse; en application, ils ont donné lieu fréquemment à de graves inconvénients : s'ils sont trop lâches, ils fuient; s'ils sont trop serrés, ils grippent; les dilatations inégales en compromettent gravement le jeu. Il semble que jusqu'ici MM. Biétrix et Cie soient les seuls constructeurs qui aient résolu le problème d'une manière tout à fait satisfaisante en pratique.

La maison V. Biétrix et Cie (Forges et ateliers de la Chaléassière, anciens établissements Révollier, Biétrix et Cie), de Saint-Étienne (Loire), s'est consacrée à la construction des machines à distributeur rotatif. De concert avec son ingénieur en chef, M. Couffinhal, elle s'est attachée avec persévérance à écarter les inconvénients que l'on reproche à ce genre de distribution. La première machine de ce type, sortie de leurs ateliers, date de 1840; sa puissance était de 40 chevaux. Après de nombreux essais, elle fut vendue à la Société des forges et aciéries de la marine et des chemins de fer et installée à l'usine du Boucau, où elle n'a cessé de fournir un service régulier.

Le distributeur Biétrix, sous sa forme la plus simple, est représenté par la figure 114. *A* est l'arrivée de vapeur; *B*, l'échappement; *C* et *D*, les deux lumières aboutissant aux extrémités du cylindre; le distributeur *EE'* a la forme générale d'une clef de robinet conique, et tourne à frottement doux dans un boisseau rodé; son mouvement de rotation continu a la même vitesse que celle de l'arbre de couche, et lui est communiqué par cet arbre à l'aide de deux roues d'angle et de la tige *F*. Les lumières pratiquées sur le pourtour de la clef conique et les conduites qui les continuent à l'intérieur de cette clef sont clairement indiquées sur la figure.

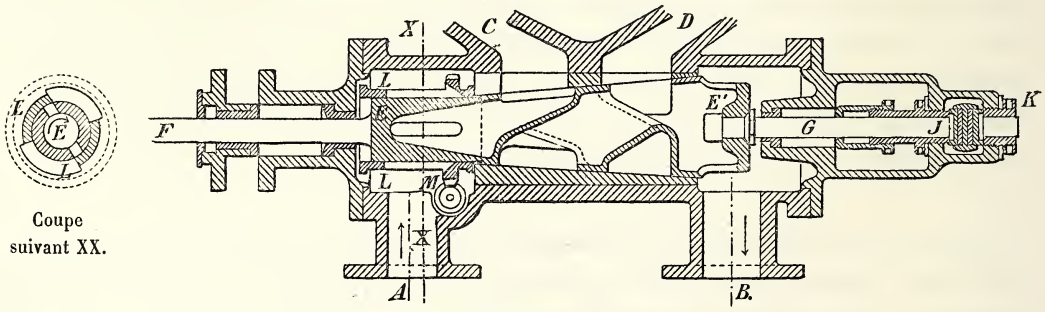


Fig. 114. — Distributeur tournant système Biétrix.

Ce qui caractérise la distribution Biétrix, ce sont les procédés par lesquels sont

assurées l'étanchéité du joint et la douceur des frottements entre la clef et le boisseau. La pression de la vapeur s'exerce en *E* sur la petite base de la clef; la grande base *E'* ne reçoit que la pression à l'échappement; ces pressions tendent à desserrer le joint, en repoussant la clef vers la droite. Cet effet est combattu par l'action d'une contre-tige *G*, qui s'appuie en *J* sur un système de grains contretenu par le boulon réglable *K*; à l'aide de quelques tâtonnements faciles, on règle cet écrou, de telle sorte qu'il y ait contact sans pression entre les surfaces frottantes. Le système, très simple, semble fort bien réussir. En *LL*, la clef, cylindrique en ce point, est recouverte par un anneau percé de lumières et susceptible d'être déplacé en tournant sur son axe; on peut ainsi faire varier l'admission; le déplacement de l'anneau mobile est opéré par la vis sans fin *M*, soit à la main, soit par l'action du régulateur commandant un train d'engrenages.

L'exposition de la maison Biétrix était fort importante, et comportait plusieurs machines fixes et locomobiles, simples ou compound. La distribution que nous venons de décrire est celle d'une machine monocylindrique. La figure 115 donne le dessin d'un

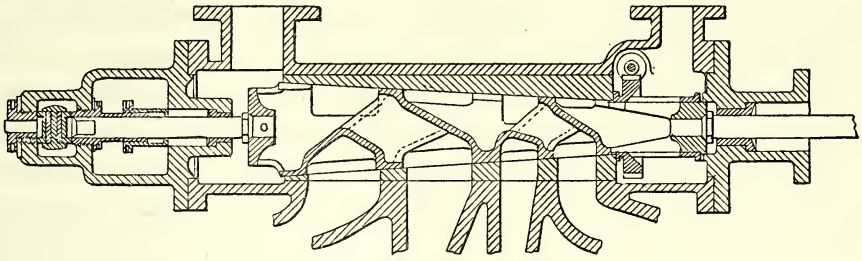


Fig. 115. — Distributeur Biétrix pour compound en tandem.

distributeur pour compound en tandem; à l'aide des explications qui précèdent, cette figure se comprend sans difficulté.

La machine à trois cylindres, construite par M. Peter Brotherhood, de Londres, est trop connue pour qu'il soit utile d'en donner une nouvelle description; sa légèreté, sa facilité d'emploi la rendent précieuse dans nombre d'applications où l'on a besoin d'imprimer à un outil une grande vitesse de rotation; c'est ainsi qu'on l'attelle directement sur des ventilateurs, des scies circulaires ou des dynamos, de manière à constituer des ensembles très compacts et peu encombrants. Grâce à ses dispositions bien entendues, cette machine fournit, sans inconvénient, des vitesses de 1,200 à 1,500 tours par minute, et peut soutenir longtemps cette allure.

Nous arrivons actuellement à l'étude des machines dans lesquelles la vapeur travaille successivement dans plusieurs cylindres; le système a reçu différentes dénominations : *détente par échelons, en cascade, expansion multiple,* etc. La question a pris depuis quelques années une importance considérable. L'expansion multiple, qui a été longtemps réservée presque exclusivement aux applications à la marine, n'a pas tardé à gagner du terrain;

elle s'est répandue, non seulement dans les manufactures, où l'usage n'en avait jamais été absolument abandonné, mais encore, chose tout à fait imprévue naguère, elle a même envahi les chemins de fer. A l'Exposition de 1889, toutes les machines marines et la plupart des locomotives et des machines fixes de grande puissance comportaient la détente dans plusieurs cylindres. Un pas énorme a été fait dans cette direction depuis l'Exposition de 1878.

Lorsqu'une solution industrielle s'impose d'une façon aussi impérative, il est utile de rechercher les causes de ce succès, les besoins auxquels la disposition nouvelle a eu à subvenir, les précédents qui l'ont amenée. Cette recherche est singulièrement facilitée par l'historique qui a été présenté par M. A. Mallet, au *Congrès international de mécanique appliquée,* tenu à l'occasion de l'Exposition. Nous puiserons de nombreuses indications dans cet exposé magistral.

Occupons-nous en premier lieu du cas où la machine ne comporte que deux cylindres : un premier cylindre, qui reçoit directement la vapeur de la chaudière et qui est désigné sous les noms de *petit cylindre, d'admetteur,* de *cylindre de haute pression;* un second cylindre, qui utilise la vapeur s'échappant du premier, et dans lequel s'achève l'expansion; on l'appelle : *grand cylindre, détendeur* ou *cylindre de basse pression.*

Il convient tout d'abord de rappeler la distinction qui existe entre les machines du système *Woolf* et les machines du système dit *compound.* Dans les machines Woolf, la vapeur s'échappant du premier cylindre se rend immédiatement dans le second, en traversant une lumière démasquée par un seul distributeur : les points morts des deux pistons sont nécessairement concordants. Dans les machines compound, la vapeur, qui a traversé le distributeur d'échappement du premier cylindre, se rend dans un récipient intermédiaire, ou *receiver,* d'où elle est reprise par une distribution complète, pour agir dans le cylindre de détente; cette machine est, en réalité, la combinaison de deux machines en quelque sorte indépendantes, chacune étant munie de tous ses organes de distribution : la première machine puise sa vapeur dans la chaudière et l'envoie, après travail, dans le récipient intermédiaire; la seconde prend sa vapeur dans le récipient intermédiaire, comme elle le ferait dans une chaudière à basse pression. Sur le trajet que parcourt la vapeur entre le petit et le grand cylindre, il existe trois organes : le distributeur d'échappement du cylindre de haute pression, le réservoir intermédiaire et le distributeur d'admission au grand cylindre. Les points morts des deux pistons peuvent être à volonté soit concordants, soit discordants.

La conception du système compound paraît plus naturelle et plus simple; et cependant comme il arrive souvent, le système le moins simple, le système Woolf, a fait le premier son apparition; le dispositif compound est de beaucoup postérieur.

C'est Jonathan Hornblower qui semble avoir eu le premier l'idée de faire travailler la vapeur dans deux cylindres : sa patente date du 5 novembre 1781. Paralysé par l'opposition de Watt, il ne put tirer parti de son invention.

Arthur Woolf fut plus heureux : il faisait usage de pressions moins basses que celles

employées par Watt; ayant pris patente en 1804, il appliqua à plusieurs machines le système auquel il a donné son nom, et les bons résultats ainsi obtenus aidèrent à propager le système, qui fut introduit en France, en 1815, par Edwards père, l'ingénieur et bientôt l'associé de Perrier, fondateur d'un des plus anciens ateliers de construction de machines de notre pays. Le type de machine établi par Edwards est la machine Woolf à condensation et à balancier; il est demeuré classique jusqu'à nos jours, avec ses dispositions et proportions primitives.

Les origines de la machine compound sont moins bien connues; le terme de *compound* se retrouve dans une patente de Watt, mais avec un sens différent de celui qu'on y attache aujourd'hui. Il semble que, dès l'année 1829, les ateliers de Feyenoord, près de Rotterdam, aient transformé d'anciennes machines de bateaux à haute pression en machines compound, par l'addition d'un cylindre de détente et d'un condenseur. Cette transformation fut appliquée à un certain nombre de bateaux. L'idée en doit être attribuée au constructeur hollandais Roëntgen, fondateur de l'usine de Feyenoord. Le système fut appliqué en France par la maison André Koechlin, qui le breveta en 1834. Il demeura longtemps sans prendre d'extension notable. L'introduction de la détente par échelons dans la marine a eu, pendant de longues années, une marche lente et hésitante. Le type universellement adopté pour les usages de la marine était constitué par deux machines monocylindriques à balancier, actionnant les roues propulsives à l'aide de deux manivelles rectangulaires; l'alimentation des chaudières se faisait à l'eau de mer, et par conséquent la pression à l'admission était toujours faible; cette circonstance explique les hésitations qui régnèrent au début, les avantages de la double expansion ne se manifestant nettement qu'aux pressions élevées.

Néanmoins quelques tentatives isolées semblent avoir été faites, dès 1825, aux États-Unis d'appliquer le système Woolf aux machines de navigation; elles restèrent isolées. Beaucoup plus tard, en 1854, les célèbres constructeurs anglais Randolph et Elder reprirent ces essais, et les étendirent à un certain nombre de bateaux; ils furent suivis dans cette voie, mais avec timidité, par quelques autres constructeurs. Bien entendu, il n'était question jusqu'alors que de la machine Woolf, mais nullement de la machine compound.

Dans l'intervalle s'étaient produits les travaux de Roëntgen, travaux si remarquables et si peu remarqués, si inconnus, pourrait-on dire. Puis l'usage du condenseur par surface se répandit, et, avec lui, l'habitude d'employer les hautes pressions dans les appareils marins; enfin la nécessité de faire à grande vitesse des traversées fort longues s'imposait, aussi bien pour la marine de guerre que pour la marine de commerce; à cette condition, il ne pouvait être satisfait qu'à l'aide de machines motrices très puissantes, et en même temps très économiques comme consommation de vapeur. La question était mûre. Benjamin Normand, constructeur au Havre, lui fit faire un pas décisif. En 1860, il munit d'une véritable machine compound, à deux cylindres et receiver, le bateau le *Furet;* à la suite de ce premier essai et des résultats favorables qu'il donna,

Normand renouvela l'expérience sur plusieurs navires et avec le même succès. L'élan était donné. Les constructeurs suisses furent les premiers à suivre cet exemple; ils appliquèrent le système compound aux belles machines qu'ils édifiaient pour la navigation des lacs; les autres marines ne tardèrent pas à entrer dans la même voie, et en quelques années les machines monocylindriques eurent cédé la place sur tous les navires de mer et sur la plupart des bateaux naviguant sur les eaux douces.

L'application de la détente compound aux machines de navigation ressortait nettement des données mêmes du problème tel qu'il se posait, et ç'a été un des grands mérites de Normand, d'avoir su discerner avec précision les conditions à remplir. En dehors de la question d'économie dans la consommation, la puissance toujours croissante des appareils marins obligeait à répartir le travail entre plusieurs cylindres; dès lors, en dédoublant l'expansion, on n'augmentait pas la complication de l'appareil. Le moment moteur devait être très régulier, de manière à atténuer les vibrations de la coque; on obtenait ce résultat en croisant les manivelles. Enfin les grandes vitesses auxquelles on avait recours, aussi bien pour actionner directement l'hélice que dans le but d'alléger le moteur, écartaient les distributions compliquées.

La transformation complète des appareils de navigation à vapeur fut l'affaire de quelques années. Mais il fallut plus longtemps pour qu'elle s'étendît aux machines de l'industrie; celles-ci n'avaient pas à répondre aux mêmes exigences de puissance, de poids, de faible encombrement; elles pouvaient emprunter au volant la régularité de leur mouvement et à une distribution à longue détente l'économie dans la consommation. L'ancienne machine à balancier conservait encore bien des préférences; on la complétait le plus souvent par l'addition d'un cylindre détendeur, mais fonctionnant par transvasement direct, suivant le principe de Woolf. Fréquemment on s'en tenait à un seul cylindre, surtout pour les machines horizontales.

A l'Exposition de 1878, quelques spécimens isolés de machines compound, fixes ou mi-fixes, furent présentés et très appréciés. Toutefois le succès énorme obtenu par les détentes par déclenchement détourna l'attention. Cependant des expériences décisives ayant démontré les avantages économiques que l'on peut attendre de l'expansion multiple, beaucoup de constructeurs, parmi les mieux connus, se déterminèrent à demeurer attachés à la détente compound. Sur ces entrefaites, un événement d'une grande importance est venu accélérer le mouvement : nous voulons parler de la naissance des industries électriques et de leur développement rapide à la suite de l'Exposition de 1881. Les machines motrices actionnant les dynamos travaillent dans des conditions qui se rapprochent de celles imposées aux machines marines; de la similitude des services à faire est résultée la similitude des dispositions. A l'Exposition de 1889, la plupart des machines un peu puissantes étaient à multiple expansion, même lorsque leur distribution était donnée par des appareils perfectionnés, tels que les transmissions par déclenchement.

Un autre fait bien remarquable et presque inattendu s'est produit dans les toutes

dernières années : c'est l'application de l'expansion multiple à des machines à échappement libre. On a admis pendant longtemps que la détente dans plusieurs cylindres ne pouvait procurer des avantages appréciables que dans le cas de machines à condensation. Cette opinion peut être considérée comme tout à fait exacte, tant que la pression à l'admission reste modérée. Mais il semble qu'il cesse d'en être de même lorsque la vapeur admise atteint une pression un peu élevée. Or les pressions pratiquées ne cessent de croître d'année en année; cet accroissement est surtout rapide pour les locomotives, et rendu presque nécessaire par l'augmentation de puissance que le service de l'exploitation exige d'elles.

C'est M. Mallet qui a inauguré l'application aux locomotives de l'expansion multiple. Un grand nombre de compagnies de chemins de fer sont entrées dans cette voie; presque toutes les locomotives présentées à l'Exposition de 1889 étaient à double détente. Les applications du système aux machines fixes sans condensations sont encore exceptionnelles.

Les pressions en usage ne cessant de s'élever, on a été conduit à tripler les cylindres desservis par la même masse de vapeur. Pas plus que la plupart des inventions modernes, ce système n'est absolument nouveau : M. Mallet cite, parmi les précédents, les machines de Perkins, qui fonctionnaient à des pressions que, même aujourd'hui, l'on n'ose pas aborder, et certaines machines anglaises de filature. Mais il se hâte d'ajouter que «la première application de ce genre de machines à la navigation, où il trouve son emploi le plus important, est due à Benjamin Normand». La première machine à triple expansion paraît avoir été construite par Normand pour le bateau omnibus n° 30 de la Seine; cette machine fut commencée en 1870 et terminée en 1871.

Aujourd'hui dans les grands appareils marins, la machine à triple expansion a presque totalement remplacé la machine à deux cylindres, de la même manière que celle-ci avait pris la place de la machine monocylindrique. On en arrive même, dans certaines applications, à opérer la détente dans quatre cylindres successifs.

Quelques machines fixes à triple expansion figuraient à l'Exposition de 1889.

Les avantages de la détente multiple sont démontrés par les résultats des applications innombrables qui en ont été faites. Quels sont ces avantages? Comment se produisent-ils? Quelle est la théorie du système en question? Nous allons résumer rapidement l'état de ces différentes questions.

Les machines à détente multiple sont économiques dans leur consommation de vapeur; à ce point de vue, elles l'emportent sur les machines monocylindriques les plus perfectionnées; de nombreuses comparaisons ont été faites par des expérimentateurs exacts et sérieux et le fait paraît hors de doute. La supériorité économique de la machine à plusieurs cylindres, toujours notable, n'est pas très grande lorsque l'on a affaire à des appareils bien construits, bien conduits et en parfait état; mais elle s'accentue et devient importante, si l'état de la machine est ordinaire ou médiocre. Avec une machine monocylindrique, la consommation augmente rapidement pour peu que

la construction soit défectueuse ou que l'entretien laisse à désirer; et ces effets sont encore plus accentués avec les distributions perfectionnées. Les machines à expansion multiple sont, elles aussi, sensibles à ces défectuosités, mais elles le sont beaucoup moins; les proportions relatives de leurs organes peuvent varier dans des limites étendues, sans que l'effet utile de la vapeur soit notablement diminué; et l'on a vu de ces machines fonctionner encore d'une manière acceptable, dans des conditions d'entretien telles qu'une machine simple eût refusé le service.

Il semble que cette propriété caractéristique soit la cause dominante qui a déterminé le succès du système dont il s'agit. Mais, à côté de cet avantage capital, il en est d'autres qui ne sont pas à omettre. La machine à expansion multiple, comportant une détente modérée dans chaque cylindre, pour atteindre en définitive un coefficient total de détente élevé, s'accommode fort bien, même pour les marches les plus économiques, d'appareils simples de distribution, et en particulier de la commande desmodromique des distributeurs. Cette faculté précieuse permet d'aborder des vitesses de rotation qui seraient incompatibles avec les autres systèmes de distribution, par conséquent de réduire dans une large mesure les dimensions et l'encombrement des machines.

Je laisse de côté les autres considérations accessoires; en somme, économie dans la consommation, simplicité d'organes, entretien facile, dimensions restreintes, telles sont les qualités essentielles qui recommandent les machines à plusieurs cylindres; il n'en faut pas davantage pour expliquer leur rapide extension.

Actuellement, on peut se demander pourquoi ces machines sont économiques.

A cette question si importante, il ne semble pas possible, pour le moment, de faire de réponse bien précise. Si la théorie des machines simples est encore entourée de bien des obscurités, à plus forte raison en est-il de même en ce qui concerne les machines à plusieurs cylindres. Pour expliquer la bonne utilisation de la vapeur dans ces machines, on invoque deux raisons principales :

La première est d'ordre physique : la vapeur, comme on sait, se condense au moment de l'admission sur les parois du cylindre; puis, pendant la détente et l'échappement, l'eau chaude ainsi déposée se vaporise; ces phénomènes successifs de condensation et de vaporisation sont fort nuisibles à l'effet utile de la chaleur; et ils sont d'autant plus accentués, que la chute de température est plus grande entre l'admission et l'échappement. Or, dans les machines dont il s'agit, cette chute est coupée en deux ou plusieurs chutes partielles, ce qui doit atténuer ces fâcheux effets.

La deuxième raison est d'ordre pratique : dans une machine simple, les fuites inévitables qui se produisent dans les divers organes ont pour résultat de laisser passer la vapeur, directement et en pure perte, de la chaudière à l'échappement. En coupant par un second cylindre la différence totale des pressions, non seulement on atténue l'importance des fuites, mais encore on tire un certain travail de la vapeur qui a été perdue

par le premier cylindre. Cette deuxième cause d'économie acquiert, tout porte à le croire, une importance fort sérieuse lorsque l'entretien est défectueux.

Telles sont, à peu de chose près, les seules explications que, dans l'état actuel, il soit permis de proposer; elles sont, il faut le dire, un peu vagues et insuffisantes. Peut-on tout au moins espérer de retrouver, dans les faits de la pratique, quelques indications qui permettent de préciser ces notions? De nombreuses expériences ont été faites sur les machines à plusieurs cylindres; elles ont apporté beaucoup de chiffres, mais peu d'idées bien nettes. Les constructeurs demeurent dans un véritable embarras. C'est presque au sentiment ou d'après des théories au moins contestables qu'ils établissent les proportions des organes les plus essentiels. Quelles dimensions relatives convient-il de donner au grand et au petit cylindre? Quel degré de détente dans l'admetteur? Faut-il munir d'une chemise de vapeur l'admetteur seulement, ou le détendeur, ou tous les deux? Autant de questions et bien d'autres encore auxquelles les praticiens donnent des réponses contradictoires. Il est vrai qu'avec plusieurs cylindres, on a de l'élasticité, et que deux solutions très différentes donnent parfois l'une et l'autre de fort bons résultats. Peut-être est-ce là le seul et véritable motif de cette indécision persévérante.

Nous n'insisterons pas sur ces sujets, qui ne sont pas encore assez étudiés pour être instructifs, et nous dirons un mot des dispositions variées que l'on donne aux machines à plusieurs cylindres.

Parlons d'abord de celles à deux cylindres; elles se divisent, comme on l'a vu, en machines Woolf et en machines compound.

Dans les machines Woolf, la vapeur passant par transvasement direct de l'admetteur au détendeur, les points morts des deux pistons sont nécessairement concordants; de plus, il importe, en vue de la réduction des espaces nuisibles, que la canalisation de la vapeur entre les deux cylindres soit courte et de faible volume.

Les dispositions les plus usitées pour les machines Woolf sont les suivantes :

1° Cylindres côte à côte, attaquant une même manivelle : c'est la disposition classique des machines à balancier; quelquefois aussi la connexion est directe entre les pistons et la manivelle; la canalisation entre les deux cylindres se compose de deux lumières croisées, le dessous du grand piston communiquant avec le dessus du petit, et réciproquement.

2° Cylindres côte à côte attaquant deux manivelles opposées; les lumières sont courtes et les espaces nuisibles très réduits.

Il existe encore d'autres dispositions, mais elle sont moins employées et n'étaient pas représentées à l'Exposition.

Décrivons quelques-unes des machines Woolf.

La machine à balancier se rapporte au premier dispositif ci-dessus décrit. Ce type

semble presque abandonné à l'Exposition de 1889; on n'en rencontre qu'un petit nombre de spécimens. De cette rareté de la machine en question dans les galeries de l'Exposition, il serait inexact de conclure qu'on n'en fait plus usage dans l'industrie; elle se montre encore en nombre respectable, et soutient dignement la lutte contre les machines plus modernes et plus à la mode.

M. E. W. Windsor, de Rouen, s'est fait une spécialité de ce genre de construction, qu'il exécute avec une perfection extrême et qu'il a doté d'améliorations importantes. La machine qu'il expose a les dimensions ci-après:

Diamètre du petit piston	390	millim.
Course	1,246	—
Diamètre du grand piston	740	—
Course	1,680	—
Nombre de tours par minute	36	

Ce qui donne, pour le grand piston, une vitesse moyenne de 2 m. 016 par seconde, vitesse rarement atteinte dans les machines à balancier.

La puissance est d'environ 120 chevaux.

Ce type de machine est trop connu pour qu'il soit nécessaire de le décrire de nouveau. Parmi les perfectionnements apportés par M. Windsor, il convient de mentionner les suivants : le bâti, d'une forme élégante, est rendu indépendant des murs latéraux de la salle de la machine. Le régulateur agit sur la détente variable, par l'intermédiaire d'une transmission particulière, avec servo-moteur, sur laquelle nous aurons à revenir; par un dispositif spécial de la distribution, on a pu réaliser, dans le grand cylindre, une compression étendue, et par suite accroître la vitesse de marche.

La machine exposée par MM. Douane, Jobin et Cie (ancienne maison A. Crespin) est du système étudié par M. Quéruel. Elle est verticale, à cylindres supérieurs, forme pilon; les deux cylindres, placés côte à côte, agissent sur deux manivelles opposées. Le petit cylindre est à quatre lumières, deux d'admission, deux d'échappement, les distributeurs d'admission, qui sont très simples, puisqu'ils ne comportent pas de creux pour l'échappement, sont conduits par un excentrique circulaire et surmontés de tuiles de détente avec manœuvre à repos, comme dans la distribution Farcot.

Les lumières d'échappement du petit cylindre s'ouvrent, vis-à-vis des lumières du cylindre de basse pression, dans une boîte comprise entre deux glaces parallèles; entre ces deux glaces glisse le tiroir intermédiaire, qui sert successivement au transvasement de la vapeur d'un cylindre à l'autre et à l'échappement du grand cylindre au condenseur; pour le rattrapage du jeu et l'étanchéité, on a composé ce tiroir de deux parties, pouvant s'écarter un peu l'une de l'autre et appuyer sur les deux glaces, grâce à l'interposition d'une lame métallique formant soufflet. Ce tiroir est également conduit par un excentrique circulaire.

Le système compound est beaucoup plus en faveur que le système Woolf; il échappe d'ailleurs, grâce au réservoir intermédiaire, à la plupart des sujétions qu'impose, dans les machines Woolf, la nécessité de ne pas augmenter démesurément le volume des espaces nuisibles; aussi les dispositions auxquelles il se prête sont extrêmement variées et nombreuses; parmi les plus en usage aujourd'hui, on peut citer les deux suivantes:

1° Cylindres parallèles, attaquant deux manivelles croisées; c'est le type à peu près consacré pour les machines marines, et, pour cette application, il est ordinairement placé debout, les cylindres en haut, sous la forme dite *pilon;*

2° Cylindres dans le prolongement l'un de l'autre, ou en *tandem :* les deux pistons sont montés sur une même tige et attaquent la même manivelle;

3° Cylindres inclinés l'un sur l'autre, attaquant une manivelle commune.

Dans les machines à triple expansion, la combinaison des trois cylindres se prête à un nombre considérable de variétés; c'est tantôt le système Woolf, tantôt le système compound qui sont préférés, et quelquefois une combinaison des deux systèmes; dans certaines machines, l'un des cylindres, ordinairement celui de basse pression, est dédoublé, etc.

En tenant compte de la position des cylindres et des conditions de la distribution, on peut répartir les machines compound, ou du moins les types les plus en usage, entre les catégories énumérées dans le tableau ci-après :

1° Machines horizontales à deux cylindres parallèles, manivelles croisées, distribution ordinaire;

2° Machines horizontales à deux cylindres parallèles, manivelles croisées, distribution par déclenchement;

3° Machines verticales à deux cylindres côte à côte, manivelles croisées, distribution ordinaire;

4° Machines en *tandem,* distribution par déclenchement;

5° Machines compound diverses;

6° Machines à triple expansion.

De tous ces dispositifs, les plus répandus aujourd'hui sont le 3e et le 6e.

Le 3e (compound pilon) est employé surtout pour petites et moyennes machines de navigation et pour commande des dynamos;

Le 6e (triple expansion), sous forme pilon, est presque exclusivement en usage pour les grands appareils marins; on en trouve aussi des applications dans les usines électriques de grande puissance.

Les dispositifs 1 et 2 (compound horizontales) commencent à se répandre dans les manufactures, aussi bien pour les grandes machines que pour les puissances modérées; c'est sous cette forme que la machine compound s'est introduite dans l'industrie des chemins de fer. Ordinairement le moteur se compose de deux machines distinctes, attelées par manivelles croisées sur un même arbre droit, portant le volant entre ses deux paliers.

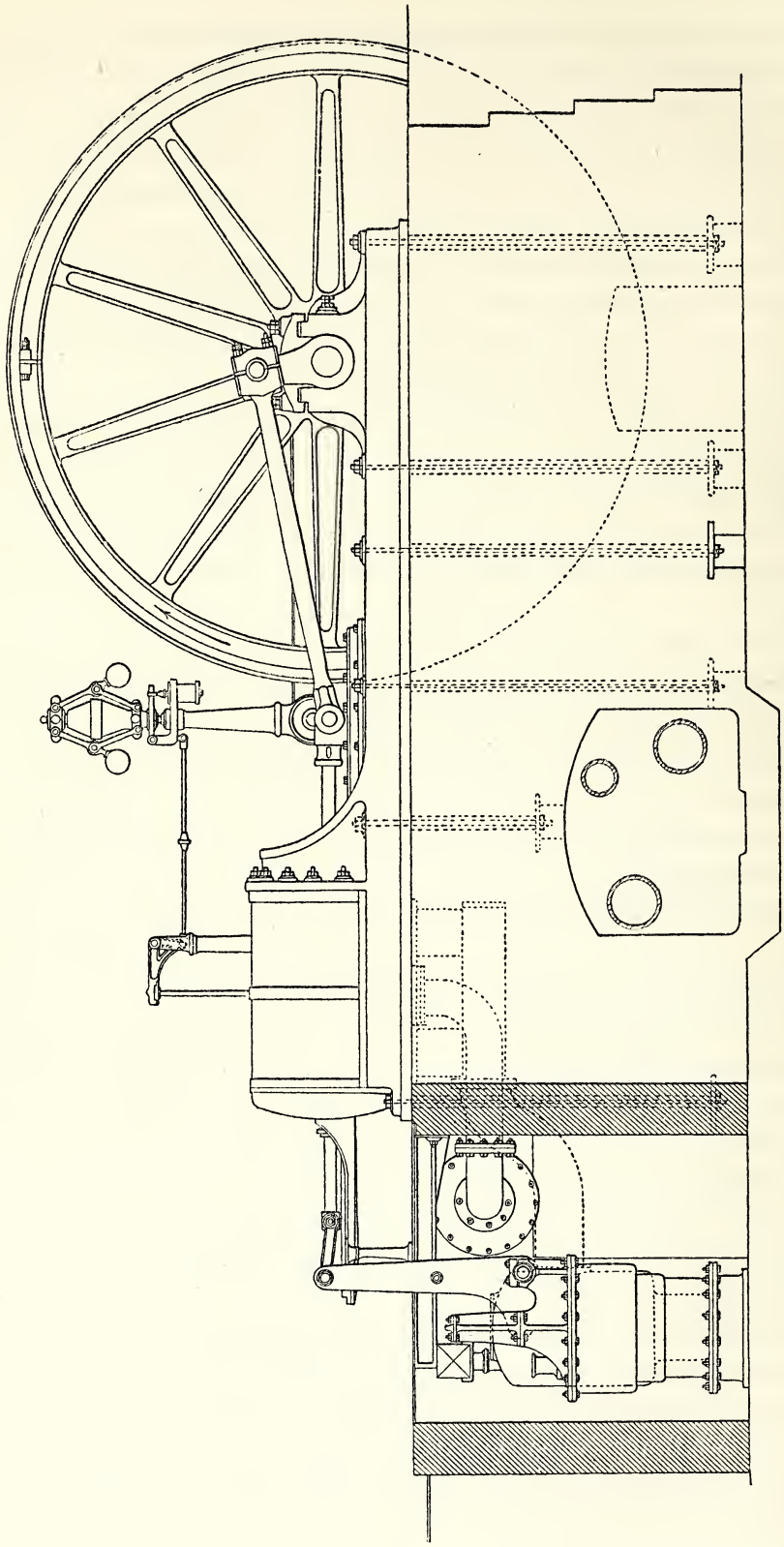


Fig. 116. — Machine compound de la Société anonyme du Phœnix. — Élévation.

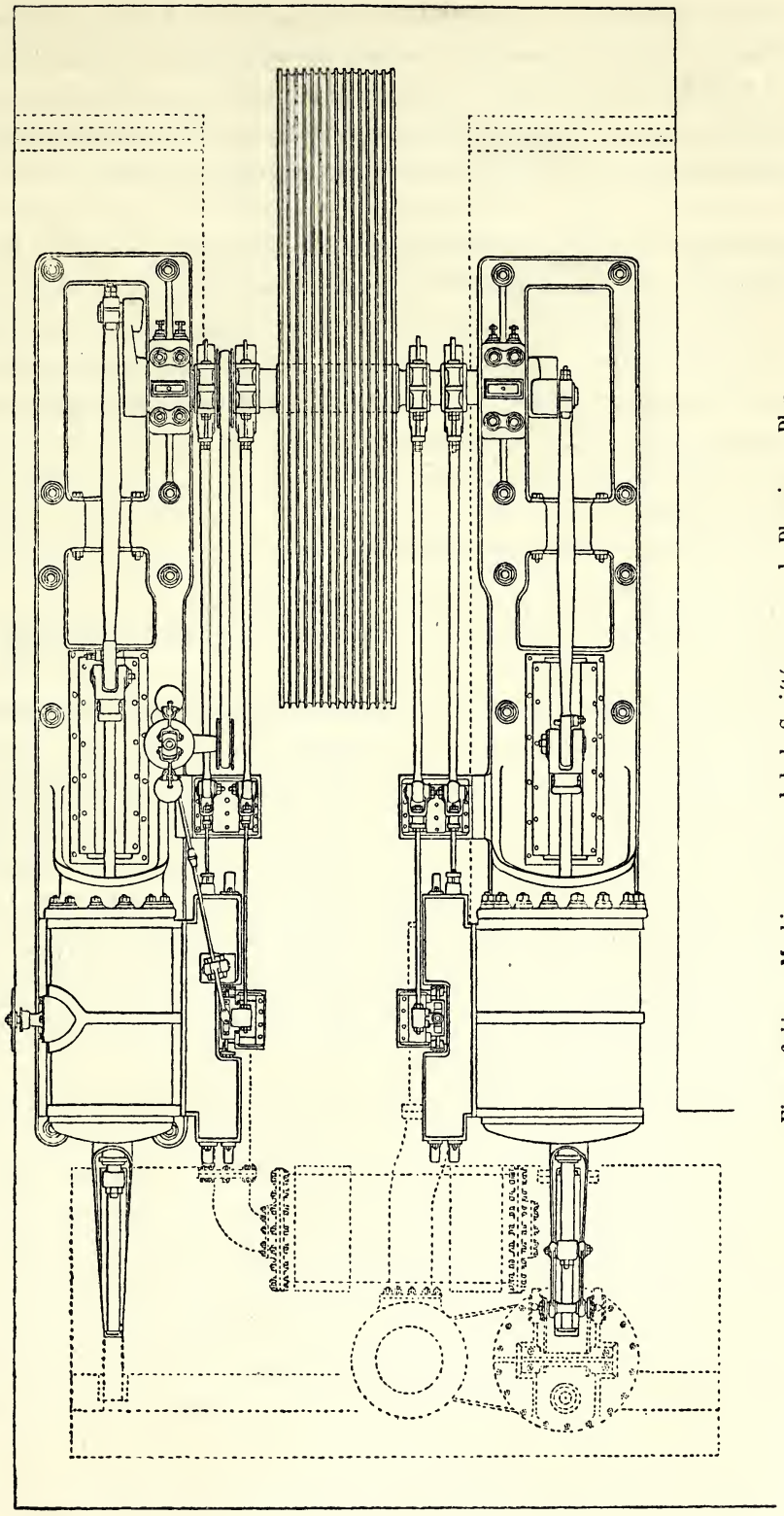


Fig. 116 *bis*. — Machine compound de la Société anonyme du Phœnix. — Plan.

En marche ordinaire, la vapeur passe d'une machine à l'autre, en traversant le receiver. Mais, en cas de réparations, on peut encore marcher avec un seul cylindre : il suffit de modifier la tuyauterie et de débieller la machine, qui doit rester immobile.

L'Exposition comportait quelques spécimens extrêmement remarquables de machines compound horizontales; nous allons en faire une description rapide.

La magnifique machine compound exposée par la Société anonyme du Phoenix, de Gand (Belgique), est un des plus beaux modèles de grand moteur de manufacture (fig. 116). Deux cylindres horizontaux attaquent les manivelles montées à 90 degrés sur un arbre droit; entre les deux paliers, l'arbre porte un volant-poulie, avec rainures circonférencielles pour transmission par câbles. Les dimensions principales sont :

Diamètre du cylindre de haute pression	580	millim.
Diamètre du cylindre de basse pression	950	—
Course commune	1,200	—
Nombre de tours par minute en marche normale	62	

La vitesse moyenne du piston est de 2 m. 58 par seconde.

Avec une pression de 7 kilogrammes à la chaudière, cette machine développe environ 400 chevaux.

La distribution est du système Edmond Hertay; nous avons eu déjà l'occasion de la décrire; elle est représentée ci-dessus par la figure 87, à laquelle nous aurons à nous référer pour l'explication de certains détails. Cette distribution est appliquée aux deux cylindres, mais le cylindre de haute pression est seul sous la dépendance du régulateur.

Le condenseur est placé en contre-bas de la machine, et la pompe à air est actionnée par la tige du grand piston, prolongée en arrière du fond du cylindre. Les deux cylindres sont à enveloppe de vapeur, avec purge automatique; le trajet suivi par la vapeur, à partir de la chaudière, est le suivant : enveloppe du petit cylindre, petit cylindre, receiver muni d'une chemise dans laquelle circule la vapeur vive, enveloppe du grand cylindre, grand cylindre, échappement.

Ce qui est remarquable dans cette machine, c'est non seulement l'exécution, qui est de premier ordre, mais la beauté des formes et la bonne étude des détails. La Société du Phœnix s'est attachée à conserver les dispositions usuelles, dont une longue expérience a consacré la solidité et la valeur. Le groupement des organes est simple et rationnel; le bâti est de la forme ancienne, la forme à cadre, appuyé de toute sa longueur sur la fondation et donnant une large et sérieuse assiette aux glissières; la distribution dérive de celles de Farcot et de Meyer, avec des améliorations qui en suppriment ou en atténuent les inconvénients. L'ensemble constitue une excellente machine de manufacture, capable de fournir pendant longtemps un service régulier et économique.

La détente par obturation de l'arrivée de vapeur était appliquée sur une machine compound exposée par MM. Olry, Granddemange et Coulanghon, de Paris, et qui action-

nait une section de la transmission générale. Cette machine diffère, par ses dispositions, du type ordinairement adopté pour les moteurs d'atelier. Les deux cylindres, très rapprochés l'un de l'autre, sont complètement entourés d'une capacité formant réservoir intermédiaire; en outre, chaque cylindre est revêtu, sur ses côtés et ses fonds, d'une chemise parcourue par la vapeur vive, et le receiver est lui-même entouré d'une chemise de vapeur; toutes ces chemises sont soigneusement purgées. Le tiroir, de forme Meyer, glisse entre deux glaces : la glace du cylindre et une glace supérieure appuyée par des ressorts; il est ainsi partiellement équilibré. La glace supérieure est percée d'une lumière, devant laquelle se meut un obturateur Corliss; celui-ci est commandé par un manchon à bosses, monté sur la douille du régulateur et donnant deux déclenchements pour chaque révolution de l'arbre de couche; le rappel est opéré par un ressort à pincette. La tuyauterie permet de fonctionner, soit normalement en compound, soit avec un ou deux cylindres; on peut ainsi faire varier le travail entre 65 chevaux (petit cylindre travaillant seul), 100 chevaux (marche compound), 185 chevaux (grand cylindre seul) et 250 chevaux (les deux cylindres conjugués).

MM. Chaligny et Cie (ancienne maison Calla), de Paris, exposaient une machine compound horizontale (fig. 117), qui actionnait la transmission dans la classe 52; cette machine avait les dimensions ci-après :

Diamètres des cylindres	280 et 485 millim.
Course des pistons	500 —
Nombre de tours par minute	90
Puissance, environ	80 chevx.

Les deux cylindres, placés côte à côte, agissent sur un arbre à deux vilebrequins croisés. La distribution est faite par des tiroirs à deux lumières, du système Trick; la distribution est fixe au cylindre de basse pression, elle est variable au cylindre de haute pression, à l'aide d'une transmission par coulisse manœuvrable à la main. Les deux cylindres sont venus de fonte ensemble avec le receiver et les boîtes de distribution; le bâti, d'une forme élégante, repose par deux patins sur la fondation. Le régulateur à bras croisés agit sur une valve équilibrée.

La machine horizontale compound exposée par la Société suisse pour la construction de locomotives et de machines, de Winterthur, actionnait une partie de la transmission; ses dimensions sont les suivantes :

Diamètre des cylindres	290 et 450 millim.
Course des pistons	500 —
Nombre de tours par minute	135
Puissance, environ	80 chevx.

Comme dessin général, elle ressemble à une machine compound-pilon qu'on aurait

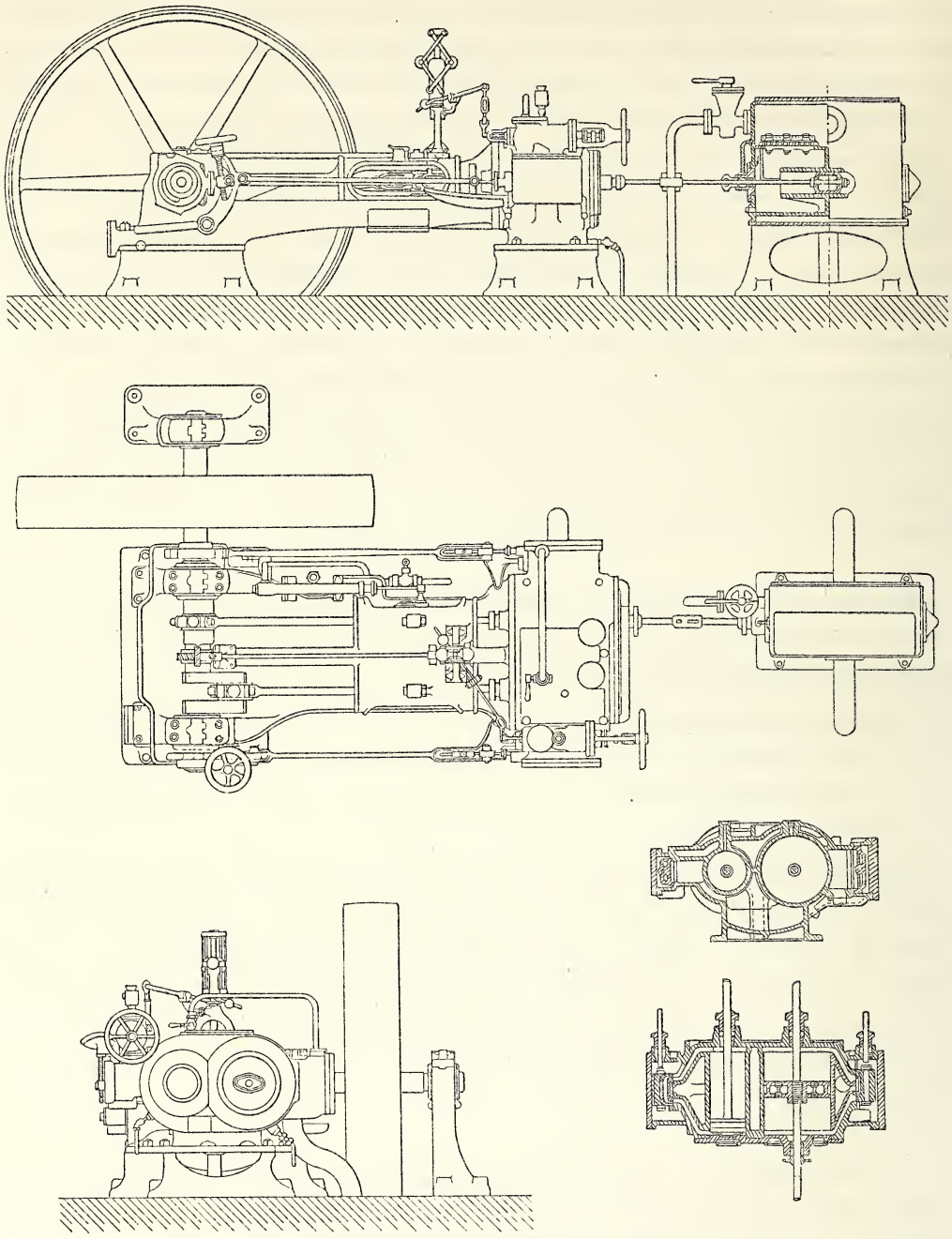


Fig. 117. — Machine compound de Chaligny.

couchée sur le dos. Les deux cylindres, avec leur chemise commune de vapeur, le receiver et les boîtes de distribution constituent une seule pièce de fonte. Cet ensemble est relié au bâti portant les trois paliers par de forts longerons en fonte, auxquels sont fixées les glissières; les tiroirs sont en forme de disques; la distribution est fixe au grand

cylindre; au petit cylindre, elle est variable par l'action d'un tiroir de détente actionné par un excentrique spécial.

Au milieu de la magnifique exposition de la Société alsacienne de construction mécanique, de Mulhouse, Belfort et Grafenstaden, figurait une belle machine compound, remarquable aussi bien par l'élégance des dispositions que par la beauté des formes et le fini du travail. Cette machine, d'une puissance de 40 chevaux en allure moyenne, a pour dimensions :

Diamètre du petit cylindre	175 millim.
Diamètre du grand cylindre	350 —
Course des pistons	650 —
Nombre de révolutions par minute	90

La figure 118 représente cette machine. Les deux cylindres, superposés et légèrement inclinés l'un sur l'autre, pour converger vers l'axe de l'arbre de couche, attaquent une même manivelle. Ils sont à enveloppe de vapeur, venue de fonte avec le corps du cylindre. Au petit cylindre, la distribution est faite par tiroir en coquille, avec détente Rider sous la dépendance du régulateur; au grand cylindre, la détente est fixe, et donnée par un tiroir à recouvrement. Ce type de machine, simple dans ses dispositions et dans ses organes, peu encombrant, utilisant bien la vapeur, facile à surveiller et à entretenir, a fait largement ses preuves dans l'industrie; la Société alsacienne a déjà livré plus de deux cents de ces machines et en construit chaque année de nouvelles.

La même maison expose une machine compound à grande vitesse, du type Armington et Sims, pour la production de l'électricité (fig. 119). Les dimensions principales sont :

Diamètre du petit cylindre	330 millim.
Diamètre du grand cylindre	480 —
Course commune	380 —
Nombre de révolutions par minute	255

De ces chiffres on déduit, pour la vitesse moyenne des pistons, le chiffre de 3 m. 26 par seconde, chiffre considérable, eu égard au peu de longueur de la course.

La machine est sans condensation; sa puissance est de 150 chevaux effectifs; les constructeurs annoncent une consommation de 11 à 12 kilogrammes de vapeur par cheval-heure.

Nous ne reviendrons pas sur le type Armington et Sims, qui a déjà été étudié plus haut. La figure ci-jointe complète d'une manière suffisante les indications précédemment données. On remarquera, sur cette figure, que sur l'arbre de la machine est montée une puissante dynamo, qui tourne avec lui.

IMPRIMERIE NATIONALE.

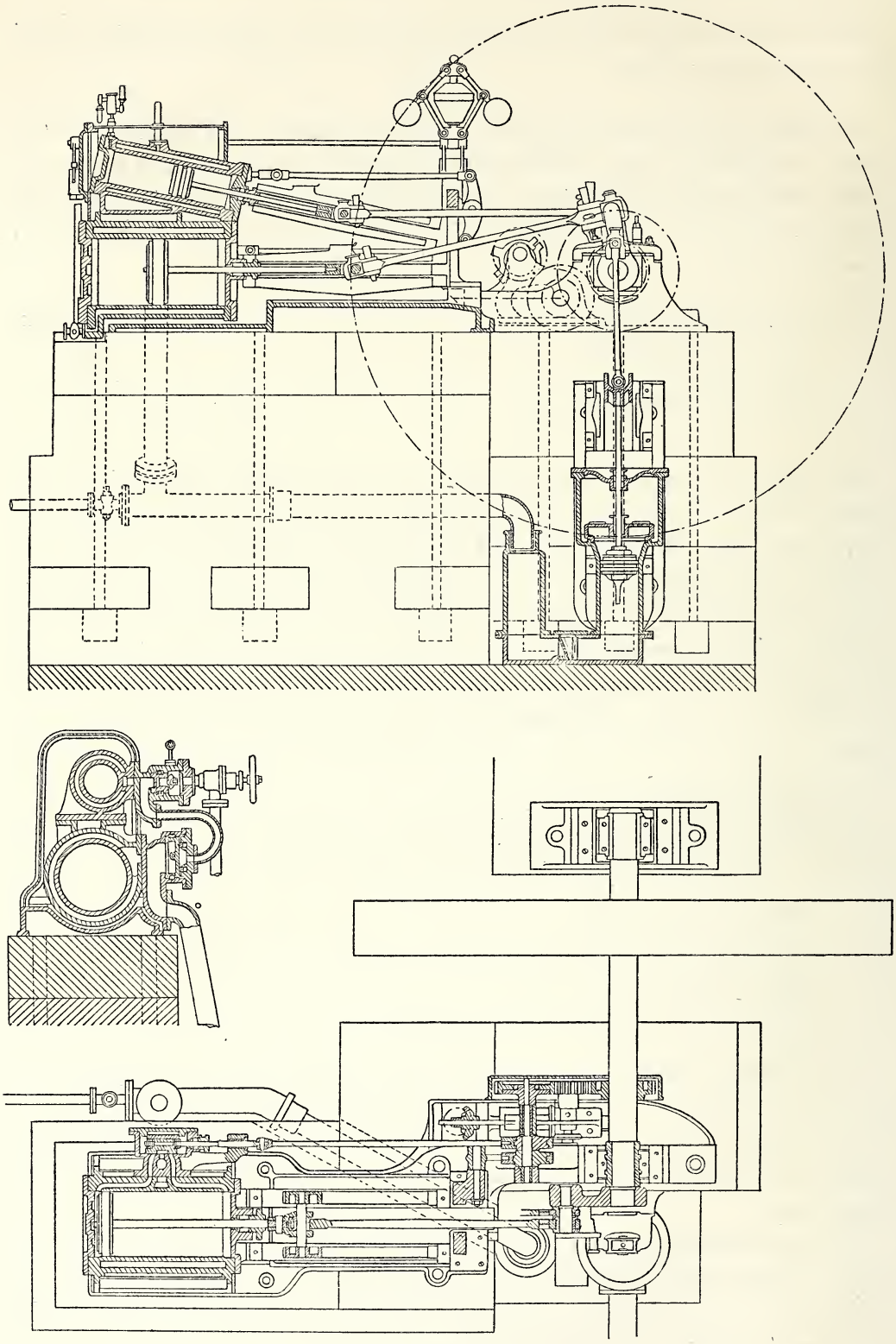


Fig. 118. — Machine compound de la Société alsacienne.

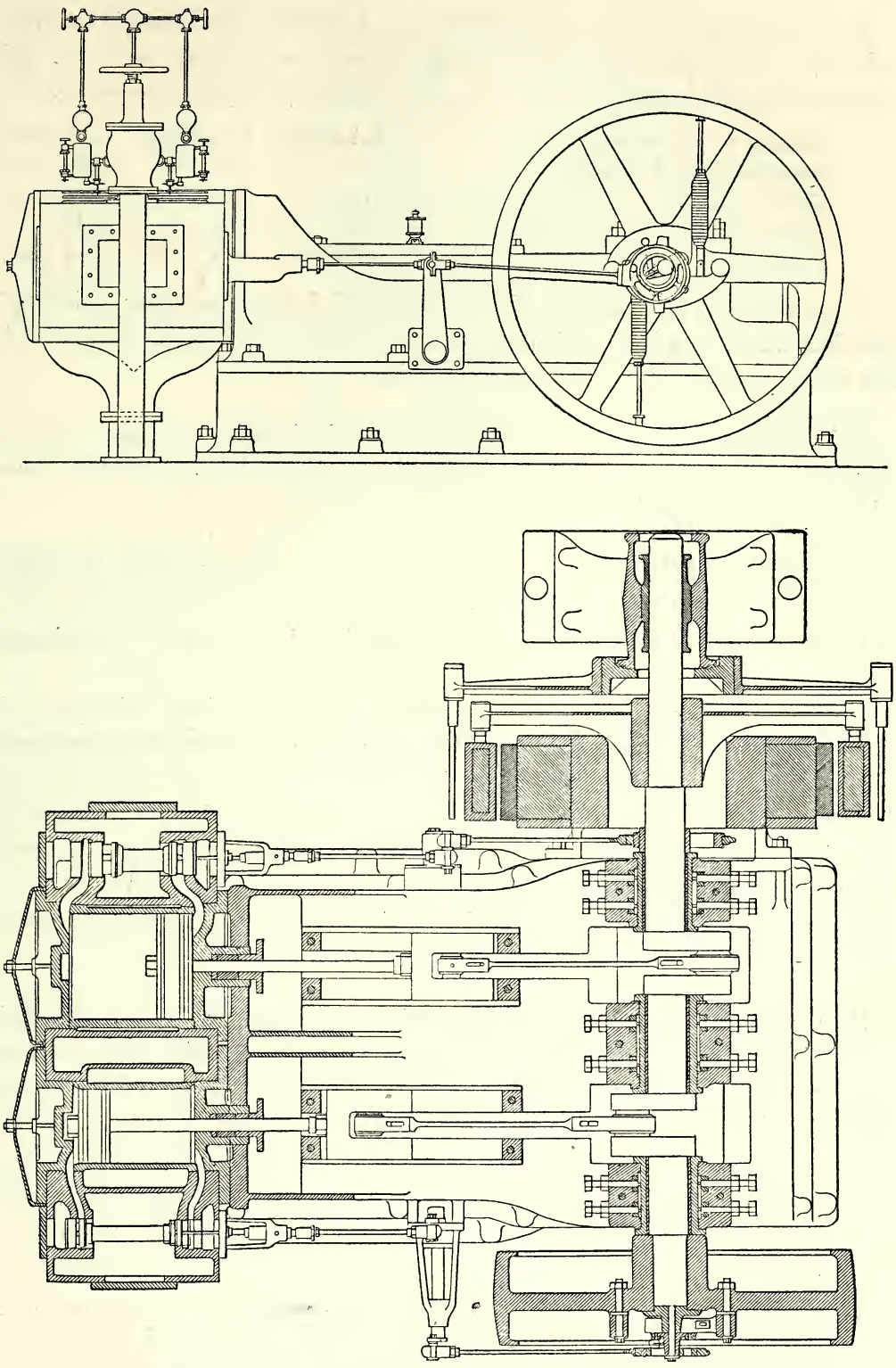


Fig. 119. — Machine compound système Armington et Sims, construite par la Société alsacienne.

La maison Davey, Paxman et Cie, de Colchester (Angleterre), était chargée du service mécanique de la station d'électricité Gramme. La force motrice était fournie par trois machines compound, dont le tableau ci-après résume les principales dimensions.

Diamètre du petit cylindre	324 millim.	470 millim.	558 millim.
Diamètre du grand cylindre	508 —	724 —	889 —
Course commune	610 —	699 —	1,220 —
Nombre de révolutions par minute	105	95	65
Puissance approximative	125 chevx.	250 chevx.	350 chevx.

Le petit cylindre est muni de la distribution variable à trois excentriques, qui est spéciale à la maison et qui a été décrite précédemment. Ces machines ont fourni un très bon service pendant toute la durée de l'Exposition.

MM. J. Boulet et Cie (ancienne maison Hermann-Lachapelle), de Paris, exposent une machine compound horizontale, qui donne le mouvement à une partie de la transmission du palais. Les dimensions sont :

Diamètres des pistons	400 et 720 millim.
Course	700 —

A l'allure moyenne de 70 tours, cette machine donne environ 140 chevaux (fig. 120).

Les deux cylindres, placés côte à côte, attaquent un arbre à deux vilebrequins; ils sont logés dans une enveloppe commune de vapeur vierge, entourée elle-même par le receiver. La distribution est donnée par des tiroirs longs; au grand cylindre elle est fixe, au petit cylindre elle est variable; à cet effet, le tiroir principal est surmonté de blocs de détente à grille, mis en mouvement par une coulisse actionnée par un excentrique spécial; la position du coulisseau dans la coulisse est sous la dépendance du régulateur; ce dernier est du système Andrade. L'ensemble de la machine est compact, d'un dessin sobre et d'une construction soignée.

Nous avons eu l'occasion de décrire la distribution par pression de vapeur imaginée par M. Bonjour. Cette distribution est appliquée à une belle machine compound construite par la Compagnie des fonderies et forges de l'Horme (Loire) et représentée par la figure 121. Les dimensions de cette machine sont :

Diamètres des cylindres	400 et 690 millim.
Course commune	800 —
Nombre de révolutions par minute	100
Puissance moyenne	250 chevx.

Au petit cylindre, la distribution est variable et établie suivant le système Bonjour; au grand cylindre la distribution est fixe; le tiroir, conduit par un excentrique circulaire, porte sur son dos une glace, sur laquelle glissent des obturateurs immobiles, dont

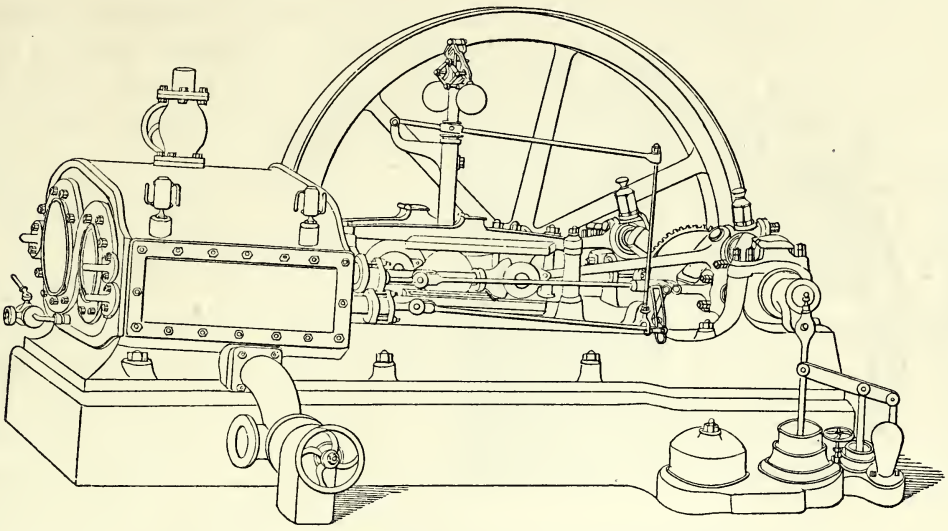


Fig. 120. — Machine à vapeur compound horizontale de M. Boulet.

la position est calculée pour qu'ils coupent la vapeur au moment voulu. Les deux cylindres sont disposés dans une enveloppe commune, formant chemise et baignée par la vapeur vive venant de la chaudière. La construction est fort belle et bien entendue.

La maison V. Biétrix et Cie, de Saint-Étienne, exposait deux machines fixes horizontales compound, munies du système de distributeur tournant que nous avons décrit plus haut.

L'une de ces machines donnait le mouvement à la transmission de la classe 50.

Diamètres des cylindres	320 et 520 millim.
Course des pistons	560 —
Nombre de tours par minute	110
Puissance, environ	120 chevx.

Cette machine est à condensation, la pompe à air étant manœuvrée par la tige du piston de basse pression, prolongée à travers le fond arrière du cylindre; chaque cylindre est desservi par un distributeur spécial, qui prend son mouvement sur l'arbre de couche à l'aide d'une paire de roues d'angle égales.

Dans la classe 52, une autre machine du même système était exposée; elle diffère du type ci-dessus par cette particularité, qu'il n'y a qu'un seul distributeur rotatif, placé entre les deux cylindres, et qui donne successivement, à l'un et à l'autre, l'admission et l'échappement.

L'Exposition comportait un grand nombre de machines compound horizontales avec distribution par déclenchement. Cette combinaison paraît fort à la mode. Si la détente compound d'un côté, la distribution par déclenchement de l'autre peuvent isolément

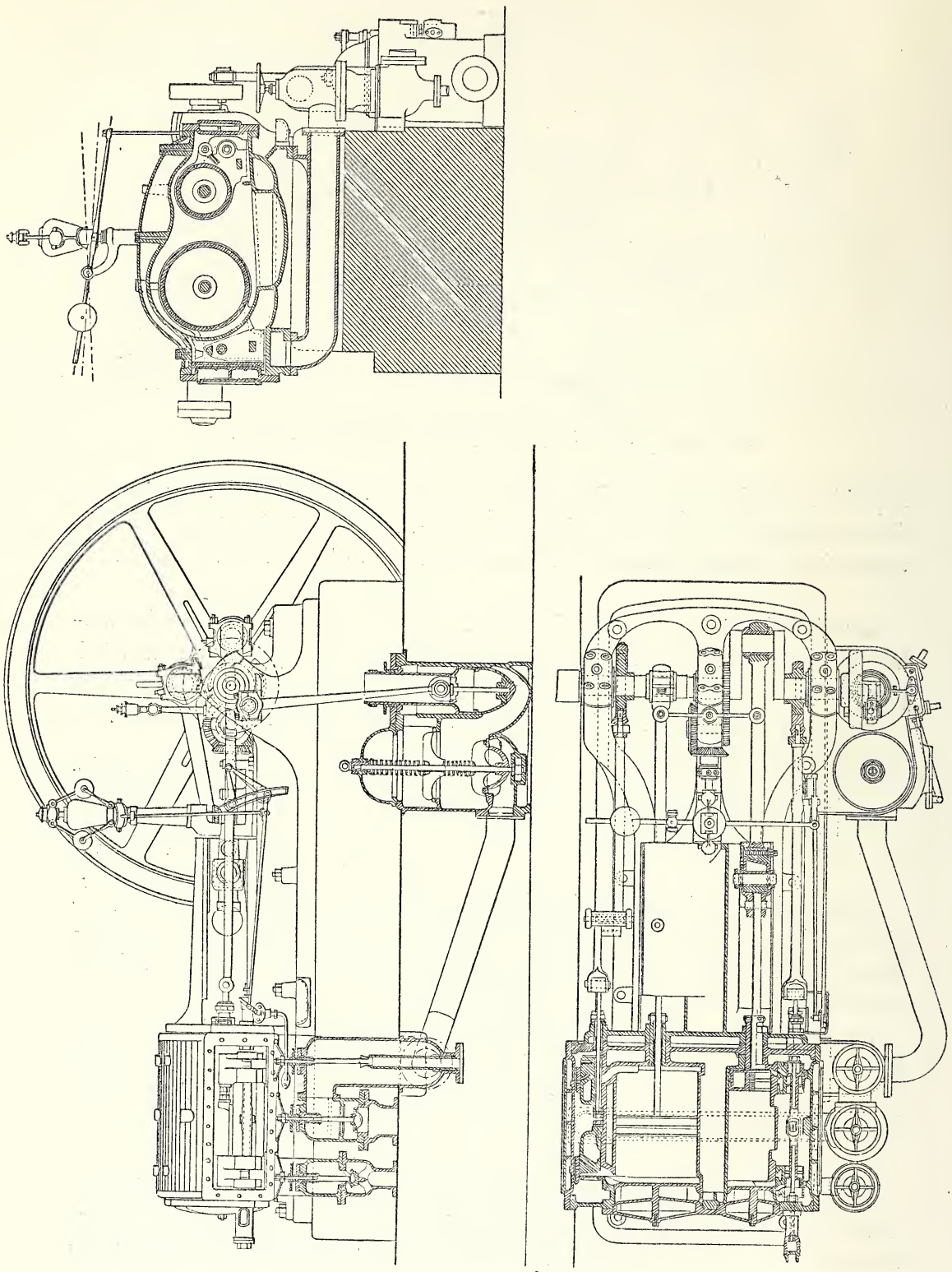


Fig. 121. — Machine compound de l'Horme, système Bonjour.

procurer une marche fort économique, il est bien naturel d'espérer que la réunion des deux systèmes fournira de nouveaux avantages. Le résultat en lui-même ne paraît pas faire de doute. Toutefois, il conviendrait de se rendre compte de l'importance de ce résultat : les avantages ainsi obtenus sont-ils bien considérables? Ne sont-ils pas payés trop cher par la complication du système et l'augmentation des frais de toute nature qu'elle entraîne?

Voilà des questions auxquelles il n'a pas été encore répondu et qui exigeraient cependant une réponse précise. Il semble que, jusqu'ici, en établissant ces moteurs complexes, les constructeurs aient subi une sorte d'engouement, plutôt que de se laisser guider par les études pratiques de longue haleine, qui seules pouvaient les éclairer.

Il paraît à peu près certain que si la solution dont il s'agit doit être parfois préférée, c'est uniquement dans certains cas particuliers, et notamment lorsque la puissance motrice à produire est considérable, que le travail journalier est continu et de longue durée, et que le combustible est d'un prix élevé. Dans tous les autres cas, c'est-à-dire chaque fois que la consommation de combustible n'aura pas besoin d'être poussée à sa plus extrême limite, il est probable que la disposition dont nous parlons cesserait d'être avantageuse.

Quoi qu'il en soit, nous allons décrire quelques-unes de ces machines, et il y en avait de fort remarquables dans les galeries de l'Exposition.

La maison G.-J.-Louis Berger-André, de Thann (Alsace-Lorraine), est une des plus anciennes et des plus renommées de l'Alsace. La fonderie et les ateliers ont été créés en 1840 par M. Jacques André, ancien élève du Conservatoire des arts et métiers de Paris. La machine exposée par M. Berger-André est une compound horizontale à condensation; ses dimensions sont :

Diamètres des cylindres	355 et 560 millim.
Course des pistons	910 —
Nombre de révolutions par minute	70

Les deux manivelles, montées sur un même arbre droit, sont croisées et comprennent entre elles le volant-poulie. Au petit cylindre, la distribution est faite par quatre tiroirs Corliss, commandés par un excentrique circulaire, avec déclenchement pour l'admission, variable sous l'action du régulateur. Au grand cylindre, desservi également par quatre tiroirs Corliss, l'admission est fixe et commandée avec déclenchement par un excentrique; un autre excentrique actionne les tiroirs d'échappement par une transmission à rapport variable de vitesses; l'excentrique d'échappement, étant indépendant de celui d'admission, permet de donner une forte compression. Chaque cylindre est relié au palier correspondant par un bâti à baïonnette. Ils sont munis l'un et l'autre d'une chemise de vapeur, qui réchauffe également les fonds; une chemise de vapeur existe aussi autour du receiver. Le condenseur est muni d'un reniflard à

flotteur, pour empêcher la montée d'eau aux cylindres. Tous les détails ont été étudiés avec le plus grand soin, et la construction est de premier ordre.

La distribution Frikart (voir plus haut) était appliquée sur trois grandes machines compound de l'Exposition, dont deux, se ressemblant par leurs traits généraux, étaient horizontales, à manivelles croisées placées de chaque côté du volant.

L'une de ces machines était présentée par la Société alsacienne de constructions mécaniques, de Mulhouse, Belfort et Grafenstaden (Alsace).

Diamètres des cylindres	440 et 660 millim.
Course des pistons	1,000 —
Nombre de tours par minute	80
Puissance, environ	250 chev^x.

Cette machine est représentée par la figure 122.

Nous ne reviendrons pas sur la distribution Frikart, qui a déjà été décrite précédemment.

Les deux bâtis sont en forme de baïonnette; le volant, de 3 m. 80, de diamètre, est muni de 8 gorges pour câbles et d'une denture. La tuyauterie est disposée de manière à permettre à volonté la marche avec ou sans condensation; au besoin, on peut se servir du petit cylindre seul.

Les cylindres sont à chemise rapportée, avec joints à cru; les deux fonds sont à circulation de vapeur, et leur assemblage sur les enveloppes est disposé de manière à s'opposer aux déplacements du cylindre intérieur. Le receiver est également entouré d'une chemise de vapeur. La pompe à air, à double effet, ne comporte que des clapets de refoulement; les clapets d'aspiration sont supprimés; la communication avec le condenseur est successivement ouverte ou fermée par le passage du piston de la pompe devant des lumières rectangulaires, pratiquées sur le pourtour du corps de pompe.

Une autre machine du même type est exposée par la maison Escher, Wyss et Cie, de Zurich.

Diamètres des cylindres	370 et 550 millim.
Course	800 —
Nombre de tours par minute	80
Puissance, environ	150 chev^x.

Elle ressemble beaucoup, par ses dispositions générales, à la machine de la Société alsacienne. Elle en diffère par certains détails de construction. Les cylindres sont venus de fonte avec leurs enveloppes et les boîtes de distribution. Le réservoir intermédiaire est muni d'un faisceau de tubes, parcourus par la vapeur vive de la chaudière, et au contact desquels la vapeur se réchauffe en passant d'un cylindre à l'autre.

M. V. Brasseur, de Lille, expose une grande et belle machine compound, avec distribution Corliss, type de 1884.

Diamètres des cylindres	610 et 965	millim.
Course commune	1,520	—
Nombre de révolutions par minute	66	
Puissance de régime	620	chev^x.

La vitesse moyenne du piston est, à cette allure, de 3 m. 344 par seconde. Cette machine tournait à vide. Elle se compose de deux machines horizontales Corliss, presque identiques, sauf les diamètres des cylindres, actionnant deux manivelles croisées et comprenant entre elles un volant à gorge. L'exécution de cette puissante machine est de premier ordre. Les cylindres sont fondus d'une pièce avec leur enveloppe, et leur chemise reçoit la vapeur vive de la chaudière; il en est de même du receiver tubulaire, intercalé sur le trajet entre les deux cylindres. Le condenseur est placé dans la fondation; la pompe à air est actionnée par un balancier prenant son mouvement sur la crosse du grand piston; le même balancier commande les pompes de purge, qui aspirent les condensations des enveloppes et les renvoient à la chaudière. Le régulateur agit à la fois sur les distributions des deux cylindres, ce qui a pour effet de réprimer très promptement les écarts de vitesse.

La même maison exposait une machine compound, du système Wheelock de 1878, qui actionnait les dynamos de la Société pour la transmission de la force par l'électricité.

Diamètres des cylindres	406 et 660	millim.
Course	1,220	—
Nombre de révolutions par minute	75	
Puissance en allure normale	290	chev^x.

La vitesse moyenne du piston est de 3 m. 05 par seconde.

A part le mode de distribution, cette machine ressemble à la précédente par ses dispositions générales. Les cylindres sont à chemise de vapeur rapportée et chauffage indépendant. La détente est variable dans les deux cylindres sous l'action du régulateur.

Les deux machines que nous venons de décrire sont d'une construction admirable, digne en tout de la réputation qu'a léguée à la maison Brasseur l'ancienne maison Le Gavrian, qui l'a précédée.

Le système Wheelock est également représenté par une machine compound horizontale exposée par M. A. de Quillacq (Société anonyme de constructions mécaniques), d'Anzin (Nord).

Diamètres des cylindres	455 et 840	millim.
Course	1,066	—
Nombre de révolutions par minute	70	
Puissance, environ	300	chev^x.

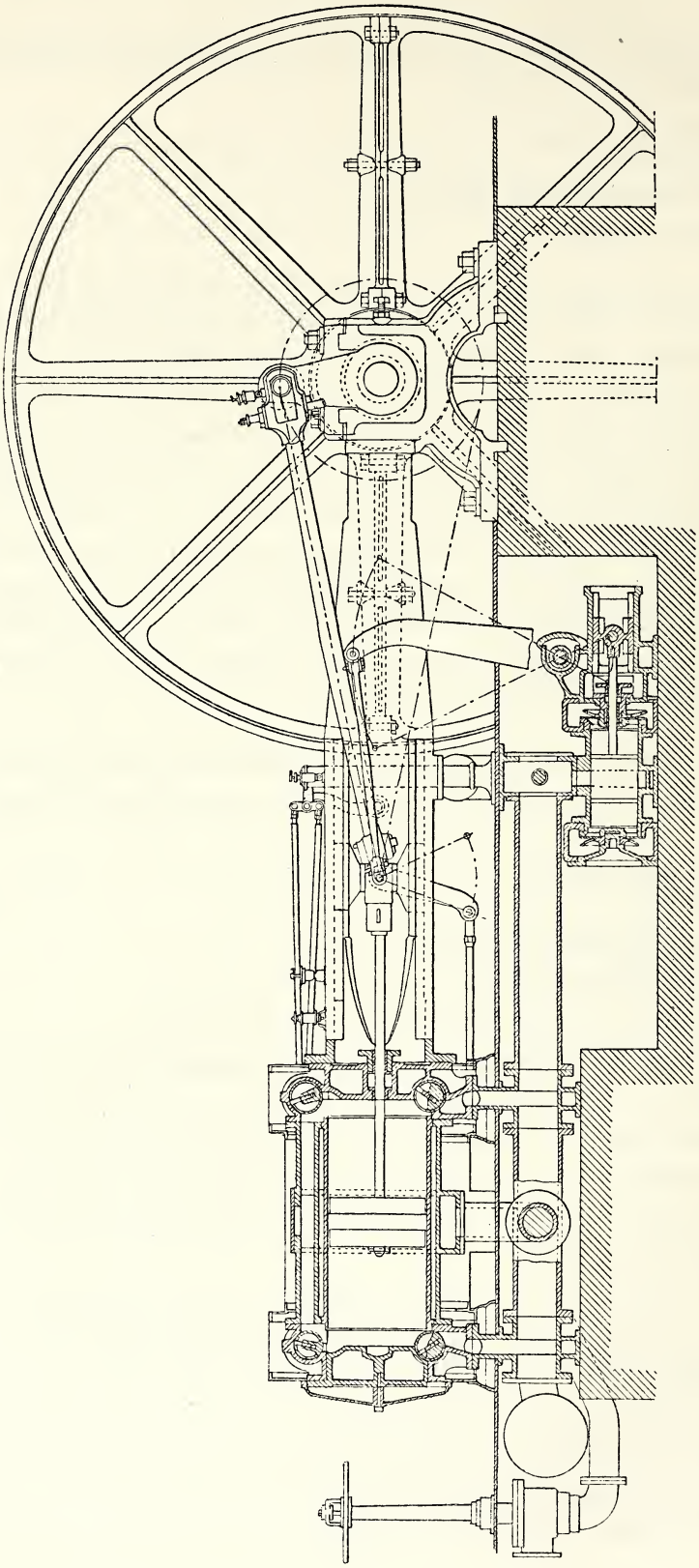


Fig. 122. — Machine compound système Frikart, de la Société alsacienne.

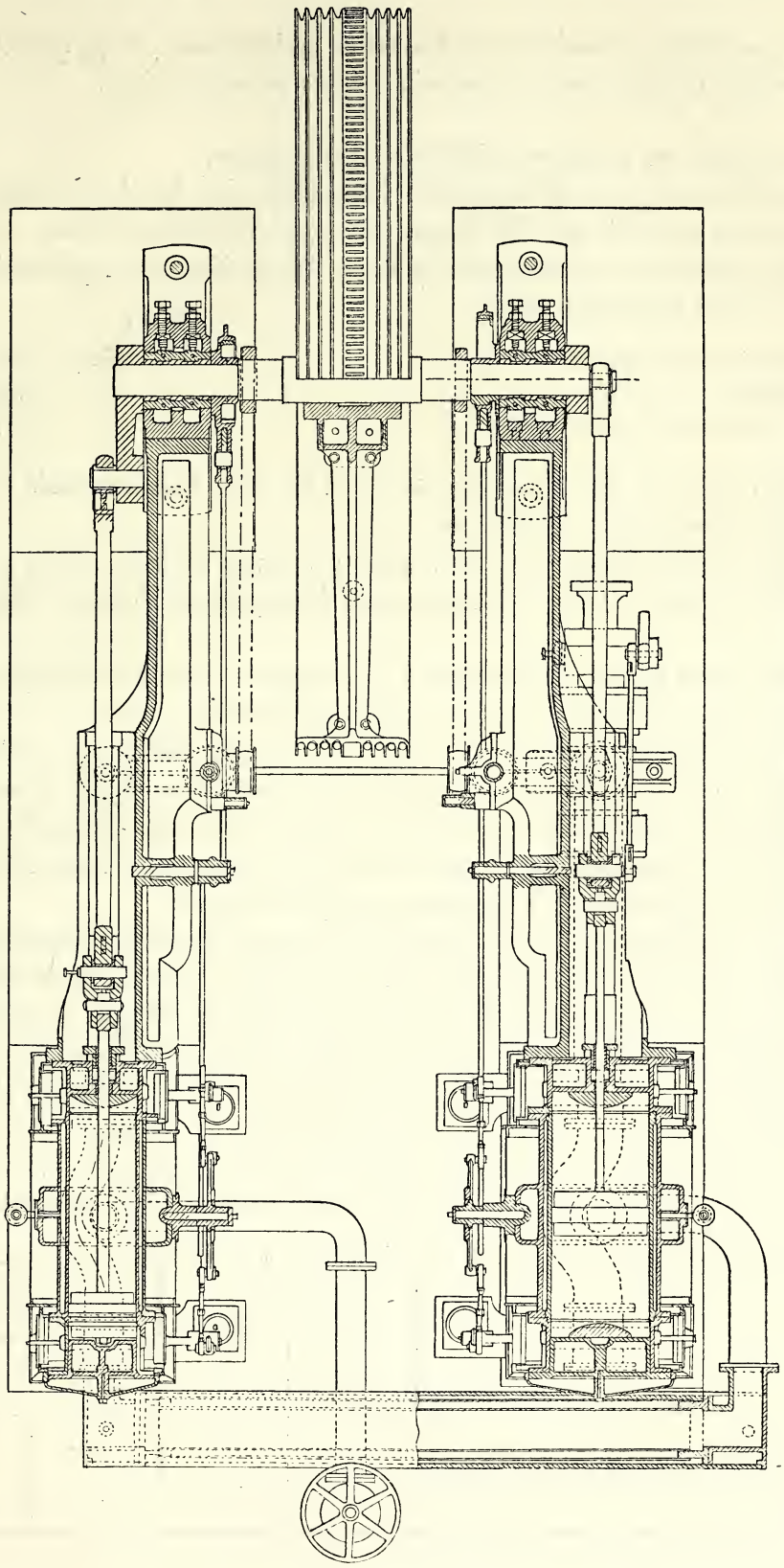


Fig. 122 *bis*. — Machine compound système Frikart, de la Société alsacienne.

Chaque cylindre est muni d'un condenseur en prolongement, ce qui permet, en cas de réparation, de faire marcher la machine comme monocylindrique.

Nous arrivons aux machines à distribution par soupapes.

De toutes les machines qui figuraient à l'Exposition, une des plus justement admirées était celle présentée par MM. Sulzer frères, de Winterthur (Suisse). Cette machine, qui actionnait la transmission du Palais des Machines, est représentée par la figure 123. Ses dimensions sont :

Diamètres des cylindres	500 et 800 millim.
Course	1,400 —
Nombre de tours par minute	75

Ce qui donne une vitesse moyenne de piston de 3 m. 50 par seconde, rarement atteinte dans les machines de l'industrie.

Avec une pression initiale de 7 kilogrammes 1/2 et une admission de 30 p. 100 au petit cylindre (détente totale $\frac{1}{8,5}$), la puissance développée est d'environ 430 chevaux effectifs.

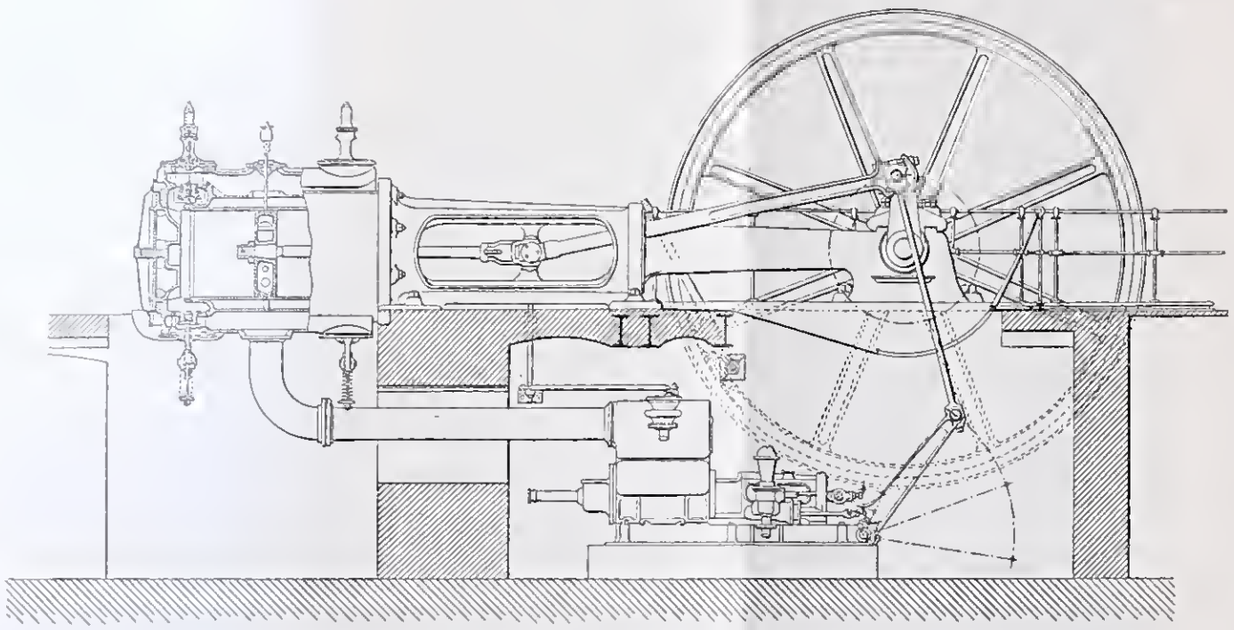
La distribution au petit cylindre est faite par soupapes, avec commande par déclenchement, suivant le dispositif que nous avons précédemment étudié.

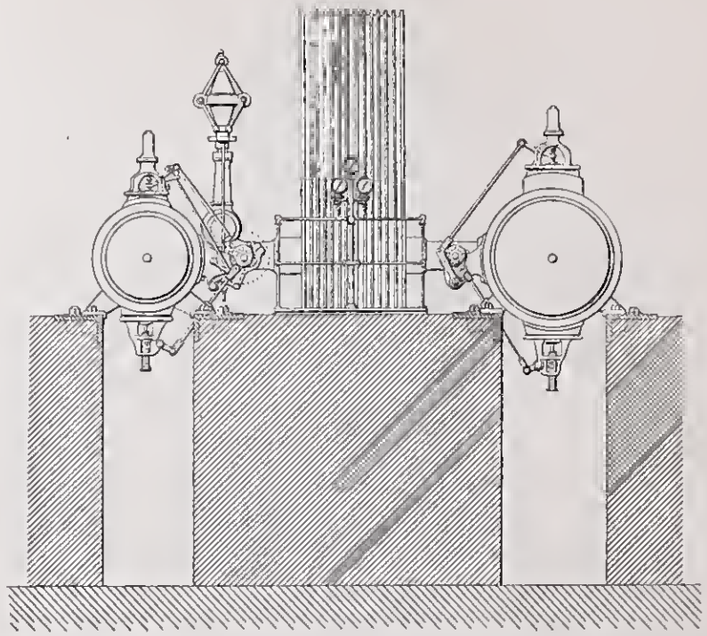
Au grand cylindre la distribution est fixe; les soupapes d'admission et d'échappement sont l'une et l'autre actionnées par des cames montées sur l'arbre de commande. Le condenseur est au-dessous de la machine, dans un vaste sous-sol d'accès facile. La pompe à air est commandée par un système de leviers prenant son mouvement sur la manivelle. Les cylindres sont à enveloppe complète de vapeur.

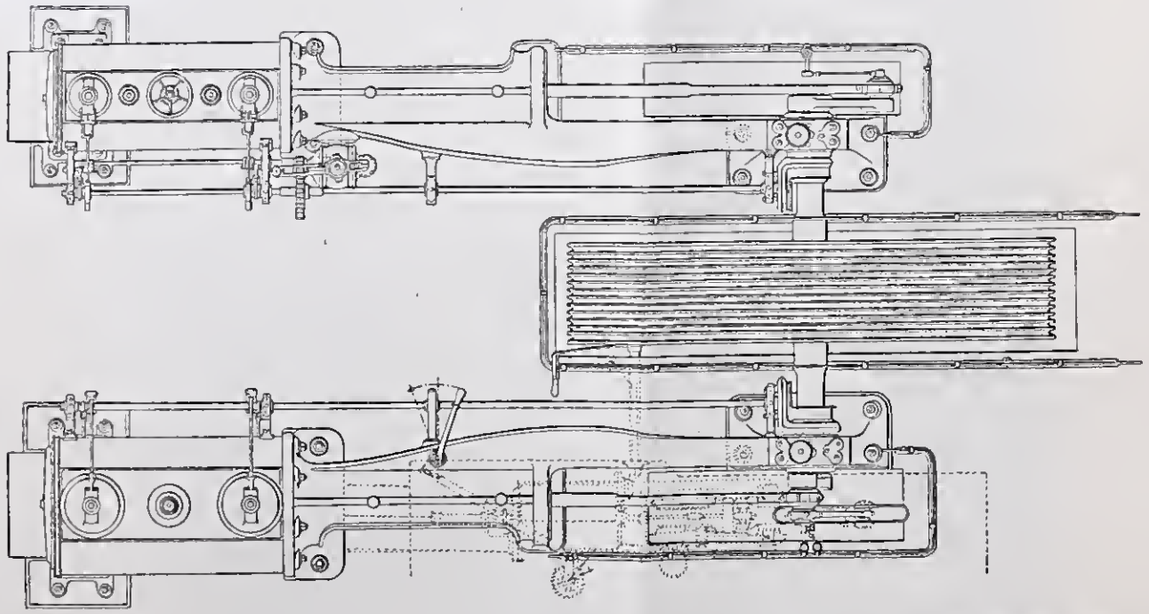
D'après les certificats qui ont été produits au jury, une machine, en tout semblable à celle que nous décrivons, après neuf mois de marche continue, aurait réalisé une consommation de 6 kilogr. 353 de vapeur par cheval-heure indiqué, en développant une puissance de 267 chevaux, avec une pression initiale de 6 kilogrammes effectifs.

Le tableau ci-après, extrait des documents fournis par les frères Sulzer, résume les résultats d'expériences de longue durée, qui ont été faites, en 1879 et 1883, sur deux machines compound livrées à une filature dans les environs de Naples. Ces essais ont été faits successivement avec un seul cylindre, puis avec la marche compound.

	MARCHE AVEC LE PETIT CYLINDRE SEUL.		MARCHE COMPOUND AVEC CONDENSATION.	
	Sans condensation.	Avec condensation.	Première machine.	Deuxième machine.
Puissance indiquée en chevaux	177	186	340	372
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué	9 k. 585	7 k. 714	6 k. 697	6 k. 220







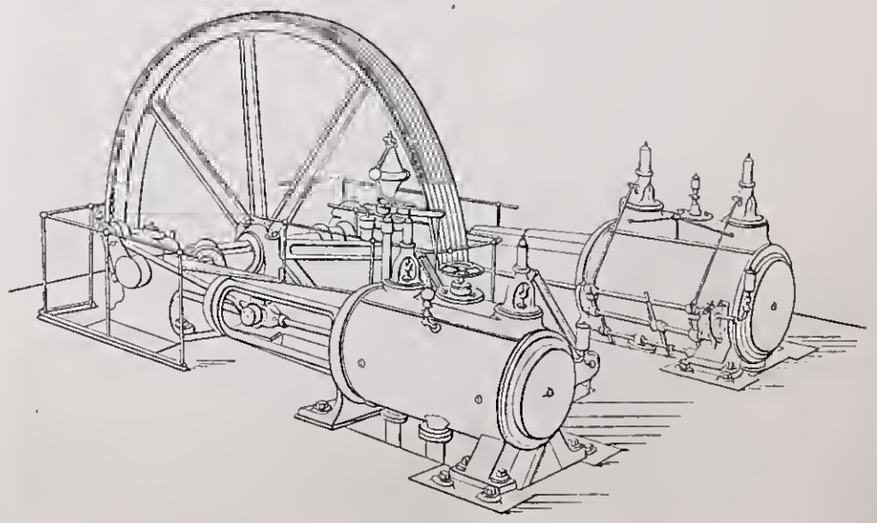


Fig. 123. — Machine horizontale compound de MM. Sulzer frères.

Ces résultats, bien remarquables, sont dus, sans nul doute, aux soins attentifs avec lesquels sont étudiées et exécutées les machines que construit la maison Sulzer, et dont la machine qui figurait à l'Exposition porte le cachet caractéristique. Par son agencement bien entendu, par son bel aspect, par ses proportions et son allure superbes, par ses formes admirables, par le fini de son exécution, cette machine attirait l'attention du public et a été jugée digne de tous les suffrages.

MM. Carels frères, de Gand (Belgique), exposaient une machine compound, du système Sulzer. Elle actionnait une section de la transmission belge. Ses dimensions étaient :

Diamètres des cylindres	525 et 825	millim.
Course	1,000	—
Nombre de tours par minute	60	
Puissance	350 à 400	chev^x.

Cette machine, qui, par ses dispositions et ses formes, se rapproche beaucoup de celle que nous venons de décrire, est surtout remarquable par le fini de l'exécution et les soins apportés dans tous les détails. M. Vinçotte, directeur de l'Association de propriétaires d'appareils à vapeur et dont la compétence en matière d'essais est bien reconnue, a soumis à des essais précis une machine livrée par MM. Carels et du type que nous étudions. Cette machine, plus puissante que celle exposée (cylindres de 576 et 899 millimètres de diamètre sur 1 m. 50 de course), travaillant sous une pression d'environ 6 kilogrammes et produisant 251 chevaux, a consommé un peu moins de 6 kilogrammes de vapeur par cheval-heure indiqué. La consommation de cette machine en huile et matières lubrifiantes a été trouvée également très faible : moins de 1,300 grammes par journée de travail pour une expérience d'une année,

Les appareils destinés à desservir la navigation sont soumis à des sujétions extrêmement rigoureuses, principalement en ce qui concerne leur poids et leur encombrement. De ces conditions spéciales est résultée une conséquence remarquable, au point de vue de la forme et des dispositions des machines à vapeur : c'est l'élimination presque absolue de la plupart des types usités dans l'industrie; aujourd'hui, en fait de machines marines, il n'existe plus pour ainsi dire qu'un seul type : la machine compound en forme de pilon. Dans ce type, les cylindres sont en haut, l'arbre de l'hélice est en bas; cet arbre est à deux ou plusieurs vilebrequins, reliés directement aux pistons par des bielles; un bâti léger et solide porte les cylindres et les réunit aux paliers dans lesquels tourne l'arbre de couche. Cet arrangement est devenu à peu près exclusif, tout au moins pour les machines actionnant des hélices.

Des usages maritimes, la machine compound-pilon a commencé à s'étendre aux installations fixes, et surtout dans les stations centrales d'électricité; les qualités qui l'avaient fait préférer pour la marine la recommandaient pour ce nouvel emploi.

La Société centrale de construction de machines de Pantin, à la suite de l'Exposition d'électricité de 1881, fut une des premières à appliquer le type marin aux usines électriques. De même qu'elle avait eu une part importante dans l'extension rapide du système compound aux machines fixes, de même cette société a joué un rôle prépondérant dans l'adaptation du type pilon aux usages électriques; ici encore une fois, l'esprit de progrès et d'initiative qui caractérise cette maison a eu les plus heureux résultats pour l'industrie. Pour adopter cette solution, qui pouvait paraître hardie, il fallait une étude bien complète et un discernement très net des besoins à contenter et des exigences à satisfaire. La Société de Pantin vit immédiatement ses efforts couronnés de succès. Dans la voie qu'elle avait ouverte, d'autres se sont engagés à leur tour, et nous voyons à l'Exposition de nombreux spécimens du type en question, variés, cela va sans dire, suivant les idées personnelles de chaque constructeur ou les applications spéciales qu'il en a vue, mais présentant tous, dans leurs traits fondamentaux, une grande similitude entre eux et avec le type marin.

L'allure des compound-pilon est toujours rapide, ce qui est la conséquence de leur encombrement réduit; par suite, la distribution est généralement simple; on emploie le tiroir en coquille ou ses variétés, avec commande desmodromique. Dans beaucoup de cas, la détente est variable par le régulateur, lequel agit, soit sur un excentrique à coulisse, soit sur des blocs de détente Meyer ou sur un obturateur de l'arrivée de vapeur. Souvent le régulateur est monté dans le volant.

L'allure est, avons-nous dit, rapide; cependant il y a lieu de distinguer. Prenons pour exemples les moteurs destinés à la production des courants électriques.

Dans un grand nombre d'usines électriques, la puissance à développer est considérable; les dynamos du type ordinaire sont actionnées par courroies, ou bien on établit des types spéciaux de dynamos, très puissantes, tournant moins vite, et montées directement sur l'arbre du moteur. En pareille circonstance, la machine motrice ressemble beaucoup aux machines marines qui donnent le mouvement aux hélices.

Mais il y a des cas où l'appareil producteur d'électricité doit tenir dans des espaces extrêmement restreints; les courroies et les dynamos de grand rayon ne peuvent plus être admises; le moteur est attelé directement sur l'axe d'une dynamo de type ordinaire, c'est-à-dire qu'il tourne extrêmement vite.

Ainsi deux catégories de compound-pilon : les machines à grande vitesse de rotation, et celles à très grande vitesse.

En tête de la première catégorie il conviendrait de décrire l'exposition de la Société centrale de construction de machines de Pantin (Seine). Ainsi qu'on l'a vu précédemment, cette maison peut être considérée comme l'initiatrice des applications que nous étudions. Les machines qu'elle exposait étaient dignes en tout point de sa légitime réputation. Cette exposition, fort importante et des plus remarquables, comportait plusieurs machines de divers types. Pour ne pas en morceler outre mesure la description, nous la réunirons à l'étude des machines à triple expansion.

Pour le même motif, nous ajournons l'étude des belles compound-pilon exposées par la maison Joseph Farcot, de Saint-Ouen (Seine).

Les Anciens établissements Cail, de Paris, avaient une exposition considérable et importante, mais qui, pour la plus grande partie, ne rentrait pas dans le domaine de la mécanique générale. Cette importante maison était représentée, dans la galerie des Machines, par une machine compound-pilon, qui donnait le mouvement à une partie de la transmission (fig. 124). En voici les dimensions principales :

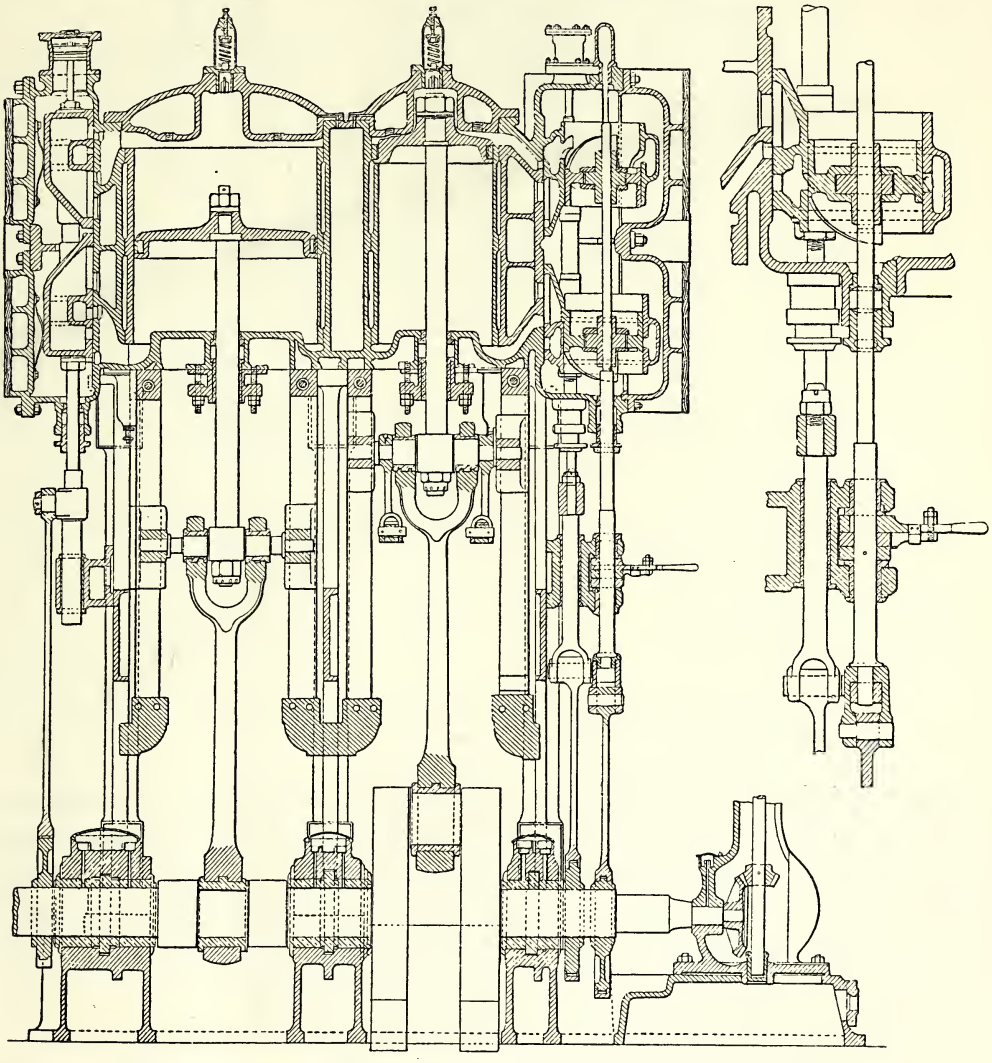


Fig. 124. — Compound-pilon des anciens établissements Cail.

Diamètres des cylindres	435 et 700	millim.
Course	700	—
Nombre de tours par minute	100	
Puissance, environ	200	chev^x.

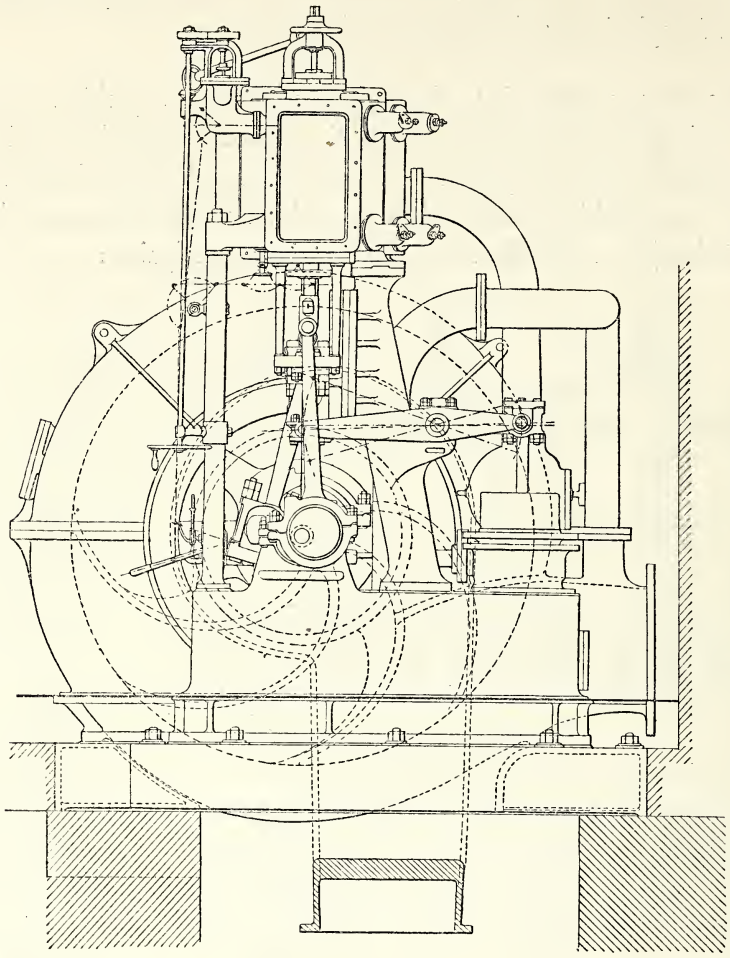


Fig. 125. — Machine compound-pilon de la Compagnie de Fives-Lille.

Au petit cylindre, la distribution est donnée par un tiroir plat en deux parties, surmonté d'une glace cylindrique, parcourue par un tiroir-piston mû par un excentrique spécial; les lumières pratiquées sur la glace cylindrique, ainsi que les tranches actives du tiroir-piston, sont hélicoïdales; le tiroir, en tournant sur son axe, fait varier la durée de l'introduction : c'est, sous une autre forme, l'application de la détente variable Rider. La détente est sous l'action d'un régulateur Andrade.

Au cylindre de basse pression, le tiroir plat en deux parties est à double orifice.

Les deux tiroirs sont soutenus par de petits pistons, qui soulagent les organes de transmission.

Les cylindres sont venus de fonte avec leurs enveloppes, le réservoir intermédiaire et les boîtes de distribution. La disposition donnée aux enveloppes de vapeur et au receiver permet de réchauffer les deux cylindres.

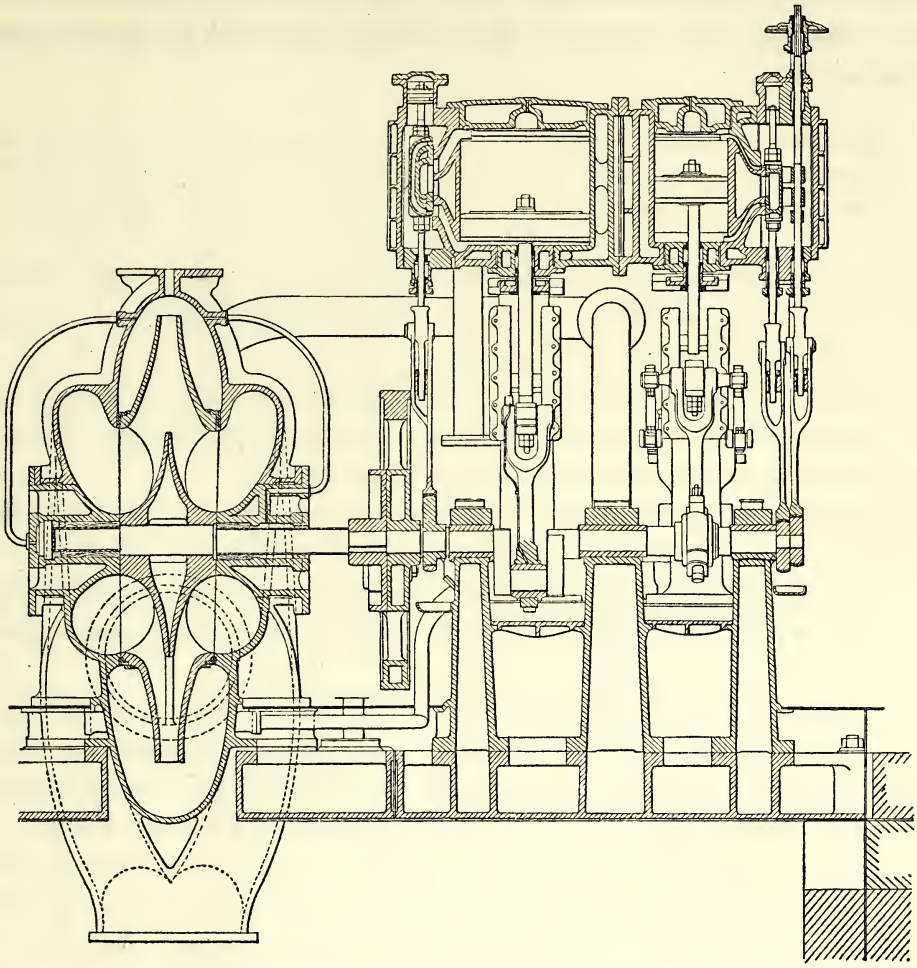


Fig. 125 *bis*. — Pompe centrifuge actionnée par la machine compound-pilon (fig. 125) de la Compagnie de Fives-Lille.

Les cylindres sont montés sur de fortes colonnes en fonte creuse, entretoisées par des croisillons de même métal et fixées sur un socle en fonte portant les cages des paliers de l'arbre moteur. Cet arbre est muni de deux vilebrequins avec contrepoids. Le condenseur par mélange est rejeté sur le côté; la pompe à air prend son mouvement par un balancier sur la crosse du piston de haute pression; les clapets sont métalliques.

La Compagnie de Fives-Lille (Nord) exposait une superbe machine compound-pilon (fig. 125), actionnant directement une grande pompe centrifuge; cet ensemble fait partie de la machinerie destinée au service des formes de radoub du port de Dunkerque.

L'installation comporte quatre appareils d'épuisement semblables à celui exposé

IMPRIMERIE NATIONALE.

et d'autres machines pour des usages divers. Nous reviendrons ultérieurement sur la pompe centrifuge; pour le moment, nous décrirons seulement la machine motrice. Ses dimensions sont :

Diamètres des cylindres	400 et	700 millim.
Course		450 —
Nombre de tours par minute	100 à	120

La pompe doit élever l'eau à une hauteur comprise entre 0 et 7 mètres, avec débit variant en sens inverse de 1,500 à 660 litres par seconde. La puissance en eau montée vers la fin de l'épuisement est de 62 chevaux.

La machine et la pompe sont fixées sur un diaphragme en fonte, solidement ancré et bien étanché avec les maçonneries, de façon à empêcher le passage de l'eau lorsque le niveau dans les formes est plus élevé que le diaphragme.

La distribution de vapeur au petit cylindre est donnée au moyen de tiroirs Meyer superposés et actionnés par deux excentriques; elle est variable à la main entre 20 et 60 p. 100 de la course du piston. L'admission au grand cylindre est fixe et correspond à 60 p. 100 de la course. Les organes de la transmission sont soulagés par des pistons compensateurs.

Sur le diaphragme est fixé le socle en fonte de la machine, qui porte les trois paliers de l'arbre de couche; les cylindres sont portés par des chevalets métalliques, constitués suivant la disposition ordinaire des machines marines, savoir pour chaque cylindre : en arrière, un jambage en fonte creux, portant les glissières; en avant, deux colonnes en acier, dégageant l'accès au mécanisme. L'arbre est à deux vilebrequins. La pompe à air est commandée par un balancier, prenant son mouvement sur la tête du petit piston. Le condenseur est muni d'un flotteur, ayant pour objet d'empêcher l'eau de remonter dans les cylindres. Les dispositions de cette machine sont remarquablement entendues, les formes très belles et l'exécution de premier ordre.

Dans l'exposition de MM. Buffaud et Robatel, de Lyon, figurent plusieurs machines compound; l'une d'elles, d'une puissance de 100 à 150 chevaux, actionnait la transmission du Palais.

Diamètres des cylindres	350 et	520 millim.
Course des pistons		350 —
Nombre de tours par minute	150 à	200

Une autre machine du même type, plus spécialement destinée à l'éclairage électrique, présentait les dimensions suivantes :

Diamètres des cylindres	130 et	230 millim.
Course des pistons		200 —

Elle est établie pour tourner à 300 tours environ. Ces deux machines, sauf les dimensions, sont tout à fait semblables. La figure 126 représente la seconde. La distri-

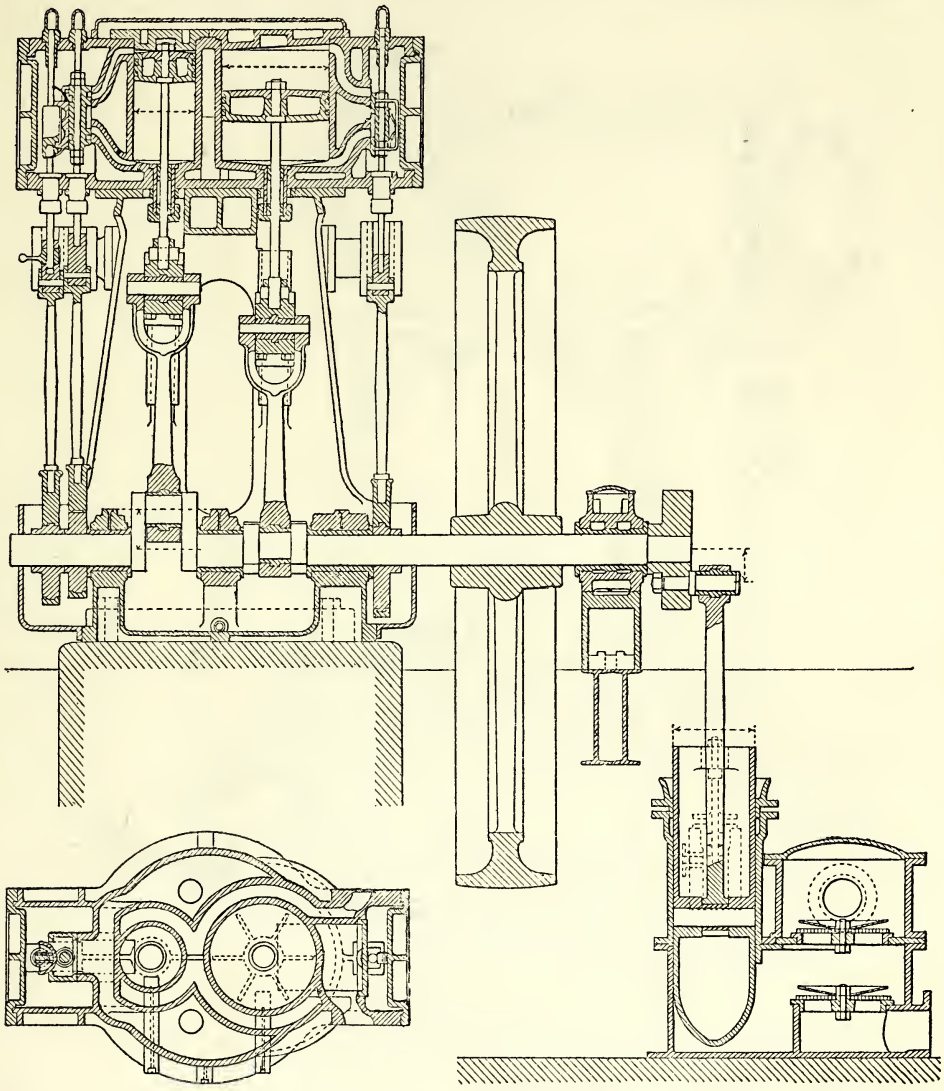


Fig. 126. — Compound-pilon de MM. Buffaud et Robatel.

bution est opérée par tiroirs en coquille; le tiroir du cylindre de haute pression est surmonté d'une tuile de détente demi-cylindrique, du système Rider.

Les deux cylindres avec leurs chemises de vapeur, le receiver et les deux boîtes de distribution sont ensemble venus de fonte. Le jambage en fonte du bâti, le socle et les trois paliers de l'arbre de couche constituent également une seule pièce fondue. L'exécution de ces machines est fort belle.

La figure 127 représente une machine exposée par la maison J. Boulet et Cie, de Paris.

Diamètres des cylindres	340 et 550 millim.
Course des pistons	400 —
Nombre de tours par minute	175

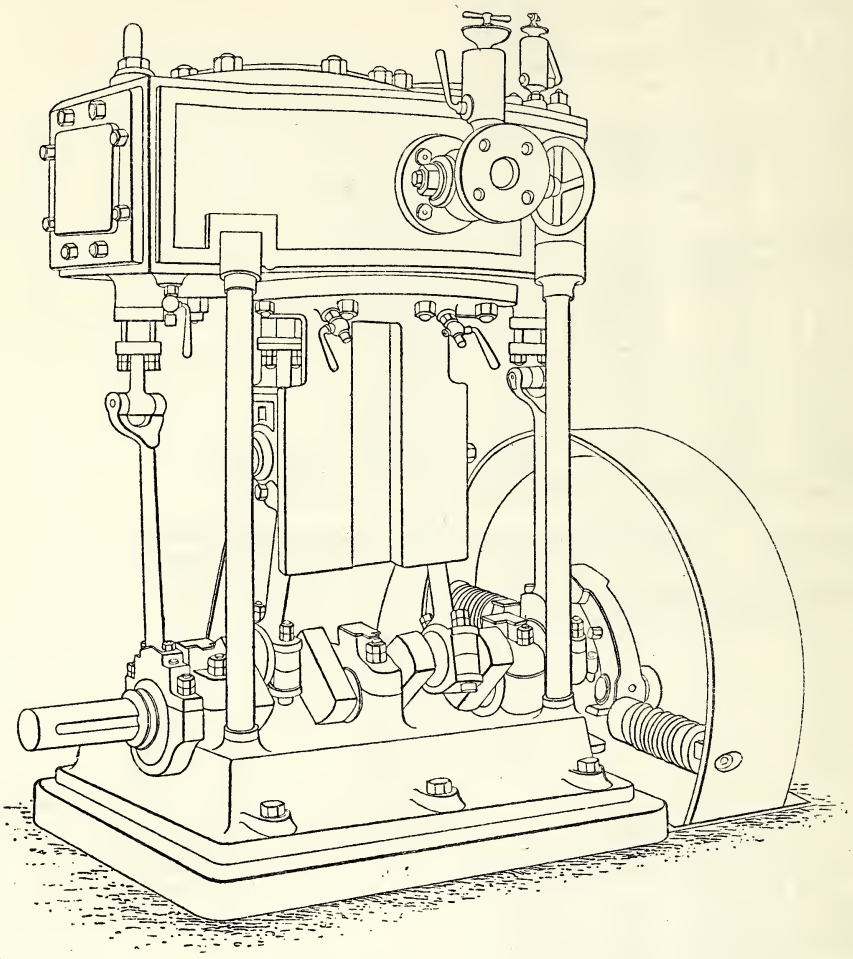


Fig. 127. — Compound-pilon de Boulet et Cie.

Cette machine donne 120 à 140 chevaux.

La distribution au petit cylindre est opérée par un tiroir-piston commandé par un excentrique à calage variable; cet excentrique est lui-même sous la dépendance d'un régulateur du genre Hartnell, placé dans le volant. Au grand cylindre, la distribution est fixe et donnée par un tiroir Trick à canal. Le jambage du bâti est venu de fonte avec le socle et les paliers.

Dans l'exposition de MM. Sulzer frères, de Winterthur (Suisse), à côté des magnifiques compound horizontales et des machines-pilon à triple expansion, figurent deux

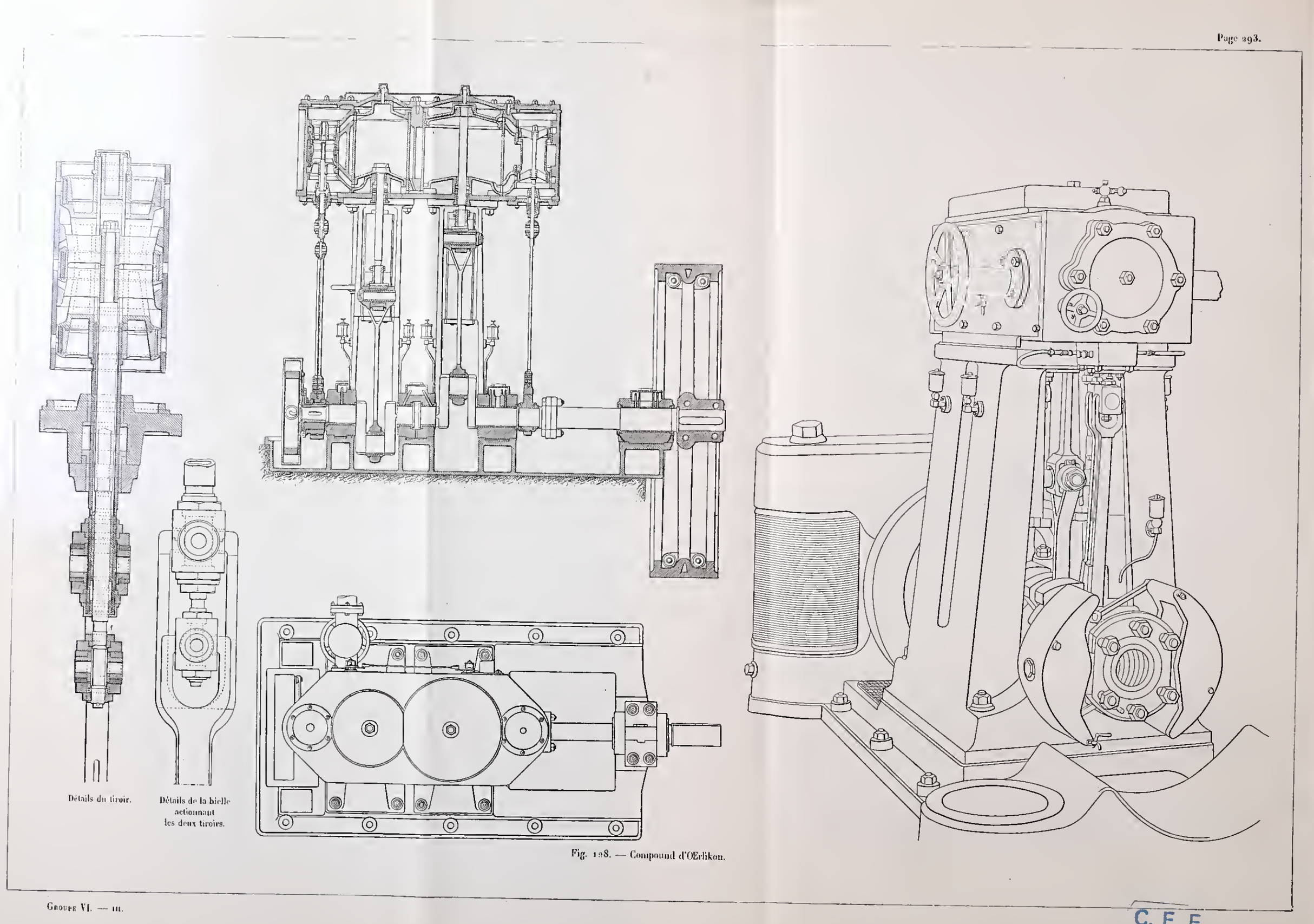


Fig. 128. — Compound d'Œrlikon.

C. F. E.

compound-pilon destinées à actionner des dynamos : en voici les dimensions principales :

	A	B
Diamètre du petit cylindre	275 millim.	210 millim.
Diamètre du grand cylindre	400 —	320 —
Course commune	300 —	240 —
Nombre de tours par minute	260	250
Puissance, environ	100 chev^x.	40 chev^x.

Dans la machine *A*, la distribution au cylindre de haute pression est faite par un tiroir-piston, actionné par un excentrique à calage variable, lequel est sous la dépendance d'un régulateur logé dans le volant. La distribution au grand cylindre est donnée par un tiroir plat à double orifice. La distribution de la machine *B* est agencée de la même manière, avec cette différence que la distribution au petit cylindre se fait par deux tiroirs réglés par un régulateur horizontal à ressort. Signalons également une particularité remarquable de ces machines : les vilebrequins sont, non pas croisés, mais opposés, comme dans les machines Quéruel précédemment décrites.

Avec la Société des ateliers de construction d'Œrlikon (Suisse), nous arrivons aux compound à grande vitesse de rotation. On sait quelle légitime réputation ont su acquérir ces ateliers par les magnifiques installations électriques qu'ils ont créées. C'est en vue d'actionner des dynamos que la Société d'Œrlikon a étudié les deux machines que nous allons décrire. Ces machines forment, pour ainsi dire, transition entre les deux catégories que nous avons établies précédemment : la première tourne vite, la seconde tourne très vite et s'attelle directement sur une dynamo. Elles ont été étudiées l'une et l'autre par M. M. Hoffmann, ingénieur de la Société. Voici leurs dimensions :

	A	B
Diamètre du cylindre de haute pression	400 millim.	200 millim.
Diamètre du cylindre de basse pression	600 —	300 —
Course des pistons	450 —	250 —
Nombre de révolutions par minute	180	360
Puissance, environ	200 chev^x.	60 chev^x.

La machine *A* actionnait par courroie une dynamo, qui communiquait le travail à la transmission générale par l'intermédiaire du courant électrique.

La machine *B* actionnait directement une dynamo pour lumière.

Le but essentiel que s'est proposé la Société, c'est d'obtenir un moteur très solide, très stable, ne vibrant pas, très régulier d'allure et occupant peu de place. Ce but est, on peut le dire, parfaitement atteint par ces belles constructions.

La machine *A* est représentée par la figure 128. Au cylindre de basse pression, la distribution est opérée par un tiroir-piston, mû par un excentrique circulaire, et donnant une distribution fixe. Ce tiroir admet par l'intérieur et échappe haut et bas; la glace cylindrique dans laquelle il glisse est percée, dans le milieu de sa hauteur, d'une lumière spéciale, par laquelle se fait l'arrivée de la vapeur, et qui est obturée par un

tiroir-piston produisant la détente variable. Ce tiroir-piston est actionné par un excentrique spécial. La tige du tiroir de détente est pleine et glisse dans la tige creuse du tiroir de distribution; la figure montre nettement les détails de ce mode de transmission. L'excentrique de détente est lui-même actionné par un régulateur installé dans le volant.

Tous les organes sont dessinés en vue d'une marche silencieuse et sans vibration, les bâtis sont très robustes; les tiges des pistons sont creuses, les boulons d'assemblage des bielles sont également creux; les corps de bielles sont minces, les portées de frottement très larges et le graissage de tous les organes soigneusement assuré.

La Société d'OErlikon emploie, pour les pompes à air de ses machines à grande vitesse, des artifices ingénieux; les pompes marchent à la même allure que la machine, les clapets sont en caoutchouc et en fibre souple, et les orifices très largement calculés; néanmoins cela ne suffirait pas, car un des plus grands obstacles à l'écoulement rapide des fluides du condenseur, c'est le mélange de l'eau avec l'air; le gaz et le liquide sont perpétuellement en conflit dans les canaux par lesquels ils ont à passer. La Société d'OErlikon a supprimé cette difficulté par le procédé ci-après : le vide est entretenu par deux pompes distinctes; l'une aspire l'eau dans le bas du condenseur, l'autre aspire l'air dans le haut de la même capacité; chacune d'elles est munie de ses clapets, de formes et de dimensions appropriées. Grâce à cet artifice, on peut obtenir un fonctionnement régulier à des allures auxquelles les pompes à air ordinaires refuseraient absolument tout service.

Ces machines d'OErlikon, qui sont des modèles de construction solide, élégante et bien entendue, fonctionnent avec une douceur et une régularité remarquables.

La lumière électrique est de plus en plus en usage pour l'éclairage des paquebots et des navires de guerre. Pour cette application, la transmission par courroie ne saurait convenir, et, d'autre part, l'encombrement des appareils doit être réduit, autant que possible. On se sert ordinairement de dynamos accouplées directement sur de petites machines compound à grande vitesse. La figure 129 représente une installation de ce genre, exposée per la Société des forges et chantiers de la Méditerranée, à la Seyne, près Toulon (Var).

Diamètres des cylindres	216 et 320 millim.
Course des pistons	260 —
Nombre de révolutions par minute	350
Puissance indiquée, environ	50 chev^x.

La figure représente la machine avec la dynamo qu'elle met en mouvement. Cet ensemble fonctionnait dans l'une des stations du Syndicat international des électriciens. La distribution est donnée au petit cylindre par un tiroir-piston et au grand cylindre par un tiroir à coquille équilibré; les deux distributeurs sont commandés directement par des excentriques circulaires. Un régulateur, monté sur l'arbre de couche, actionne une valve cylindrique.

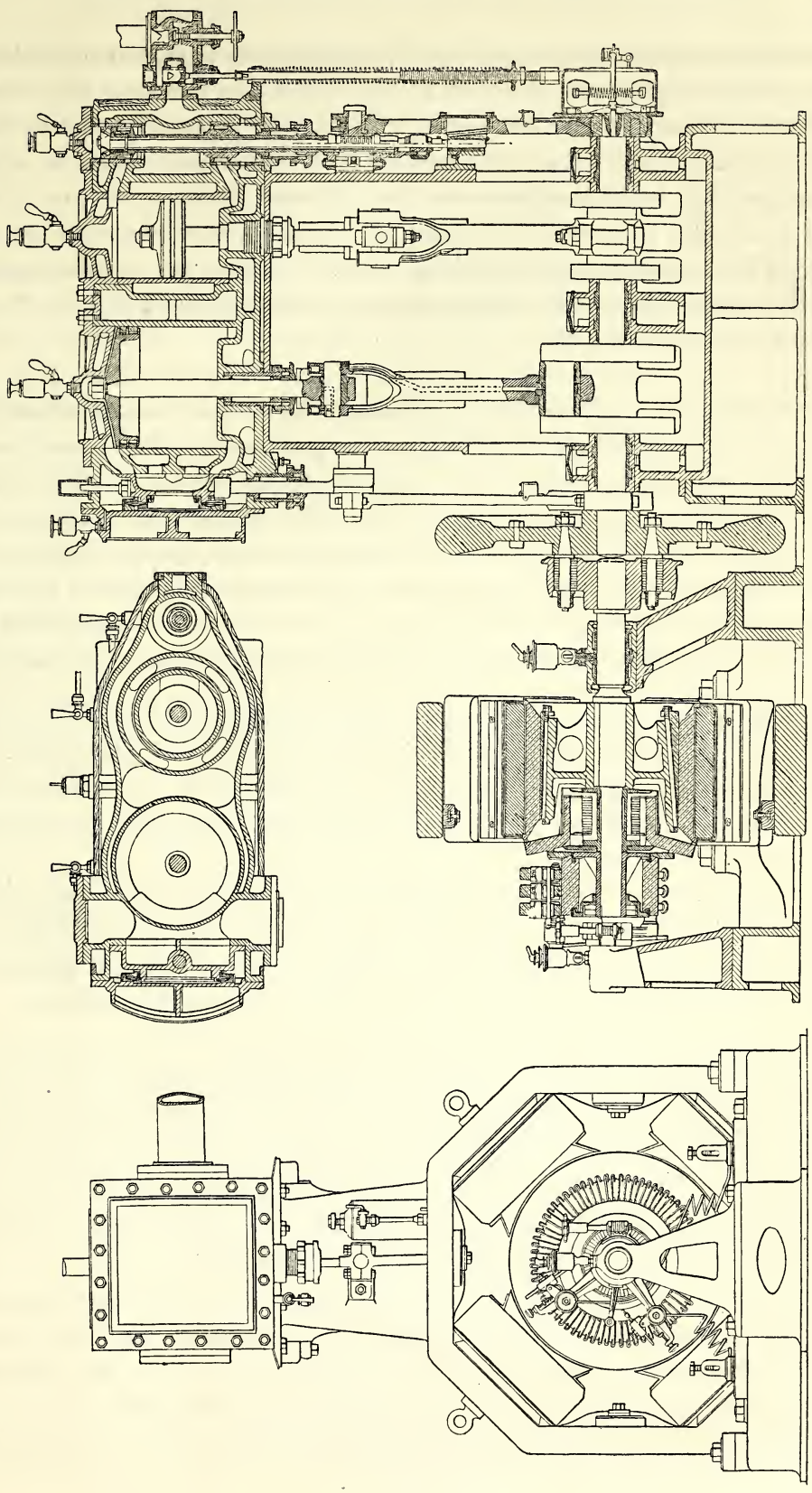


Fig. 129. — Compound dynamo des forges et chantiers de la Méditerranée.

Un ressort en hélice, monté sur la tige de transmission du régulateur et réglable à la main, permet de faire varier la vitesse. Le petit cylindre est enveloppé d'une chemise complète de vapeur, entourée elle-même par le receiver; le grand cylindre est plongé dans la vapeur du receiver, et reçoit dans ses fonds de la vapeur vierge. Le receiver, le grand cylindre, les fonds inférieurs des deux cylindres, la chemise du petit cylindre et les deux boîtes de distribution forment un ensemble venu de fonte en une seule pièce. Un léger volant, monté sur l'arbre, entraîne la dynamo par un embrayage élastique. L'installation tout entière s'inscrit dans un parallélépipède de $2^{m},50 \times 1^{m},20$ de base sur 2 mètres de hauteur.

Des machines d'un type analogue sont d'ailleurs établies par plusieurs constructeurs et s'emploient, soit pour l'éclairage électrique, soit pour conduire directement des scies, des pompes centrifuges, des hélices de canots, des ventilateurs, etc. Ainsi M. Bréguet, de Paris, construit des machines tournant à 350 tours, qui développent 45 chevaux et ne pèsent que 2,300 kilogrammes, soit 51 kilogrammes par cheval de puissance. La maison Chaligny et Cie fournit à la marine de petites machines tournant à 375 tours, donnant 18,5 chevaux indiqués et ne pesant que 265 kilogrammes, y compris l'arbre d'hélice, l'hélice et le condenseur par surface, ce qui fait moins de 15 kilogrammes par cheval.

Mentionnons encore les moteurs à allure rapide exécutés par la maison Sautter, Lemonnier et Cie, de Paris, et actionnant les dynamos; ces moteurs ont à fonctionner dans des conditions extrêmement sévères de poids et d'encombrement. Ces machines, outre leur construction fort bien entendue, se distinguent par des détails très ingénieusement conçus.

Comme dispositions générales, ces machines ne diffèrent pas des compound-pilon précédemment décrites; mais, pour qu'elles puissent fonctionner régulièrement à de pareilles vitesses et avec des poids aussi réduits, il est indispensable que tous les organes soient étudiés avec un soin extrême, et que l'exécution soit excellente.

Mentionnons, pour terminer, la machine compound-pilon, exposée par la maison V. Biétrix et Cie, de Saint-Étienne; sur cette machine était appliqué le système de distributeur rotatif étudié par M. Couffinhal, et que nous avons eu plus d'une fois l'occasion de décrire; un seul organe dessert à la fois les deux cylindres; la machine est sans condensation; la vitesse est de 350 tours à la minute. Il semble que le distributeur rotatif soit particulièrement approprié à ce genre d'application.

La détente compound s'obtient, dans certains cas, à l'aide de deux cylindres disposés l'un à la suite de l'autre; cette disposition est dite *en flèche* ou *en tandem*, par suite de l'analogie avec certains attelages à deux chevaux. Les deux pistons sont montés sur une même tige, qui actionne l'arbre de couche par une seule manivelle.

C'est là du reste l'avantage principal du système : il n'exige qu'un seul mécanisme de

transmission entre les pistons et l'arbre tournant. On a essayé parfois d'appliquer sous cette forme le système Woolf, avec transvasement direct de la vapeur; mais la lumière faisant communiquer les fonds opposés des deux cylindres prend une longueur considérable, et les espaces nuisibles sont démesurés. Ce dispositif est à peu près abandonné, et c'est au système compound qu'on a recours, en utilisant comme receiver le volume des lumières intermédiaires.

Même sous la forme compound, la disposition en tandem n'est pas très employée, du moins tant qu'il s'agit de la détente dans deux cylindres seulement. On lui reproche des inconvénients, qui, dans nombre de cas, sont graves. La machine est fort longue et occupe beaucoup de place; les efforts sur les pièces du mécanisme sont considérables; le moment moteur subit des variations étendues, aussi étendues que dans les machines monocylindriques, ce qui conduit à des volants puissants et lourds; l'entretien des presse-étoupe, le montage et le démontage des deux pistons enfilés sur une même tige et des quatre fonds de cylindre que cette tige traverse, ainsi que la tenue en ligne de cet ensemble si allongé, tout cela ne laisse pas que de présenter des difficultés, auxquelles les artifices de construction les plus ingénieux ne permettent pas d'échapper complètement.

La question se pose différemment lorsqu'il s'agit de l'expansion triple ou quadruple; c'est pour les applications de ce genre que la disposition en flèche a été le plus employée. Nous aurons à y revenir; pour le moment, décrivons seulement quelques-unes des machines à deux cylindres en tandem qui figuraient à l'Exposition en assez petit nombre.

La machine de ce genre exposée par M. E. W. Windsor, de Rouen, est une machine d'usine; elle est horizontale; ses dimensions sont :

Diamètres des cylindres	520 et 900 millim.
Course des pistons	1,250 —
Nombre de tours par minute	60
Puissance, environ	400 chev^{x}.

La distribution (fig. 130) se fait par le système Proëll, que nous avons déjà décrit en étudiant la machine monocylindrique exposée par la maison Windsor. L'admission se fait par soupapes équilibrées, avec commande par déclenchement; l'échappement est donné par des tiroirs Corliss; la détente est fixe au cylindre de basse pression et variable par le régulateur au petit cylindre. Les deux cylindres sont à enveloppe complète de vapeur, avec chemise intérieure rapportée. Les fonds en regard des deux cylindres constituent une seule pièce de fonte, formant entretoise pour maintenir la distance exacte; cette pièce est largement ajourée, de manière à permettre l'accès des presse-étoupe. Le condenseur est en contre-bas et la pompe à air est actionnée par la tige des pistons, prolongée à travers le fond arrière du cylindre. Sur cette machine, fort remarquable d'ailleurs comme conception et comme exécution, on peut reconnaître quelques-uns des inconvénients afférents au type tandem : la longueur totale de la construction est

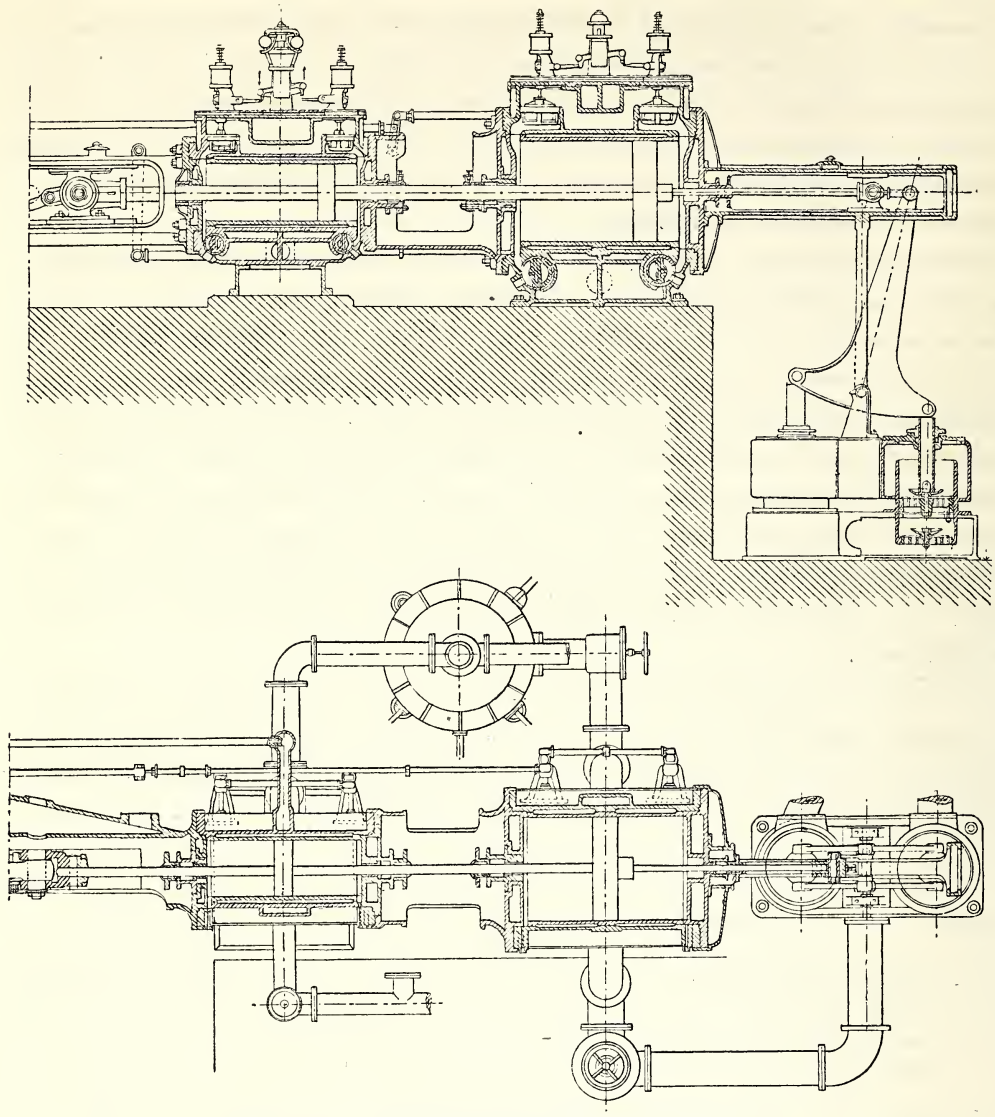
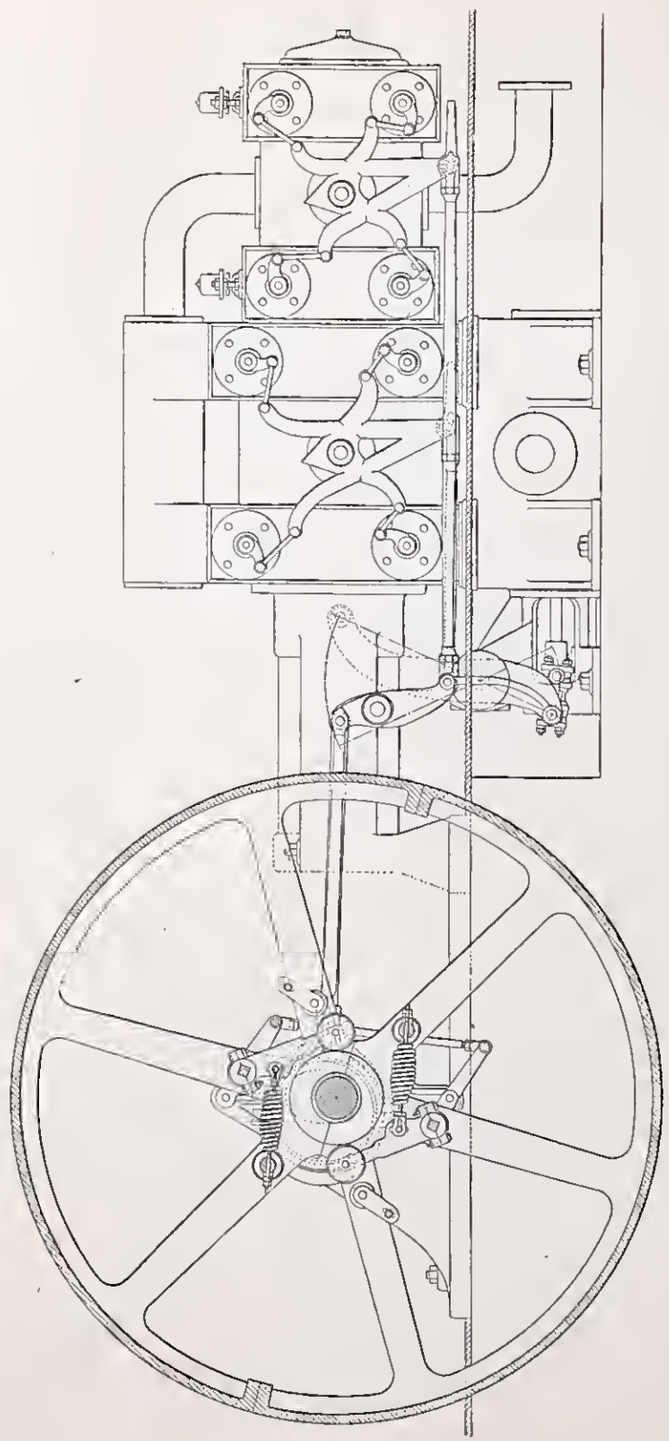


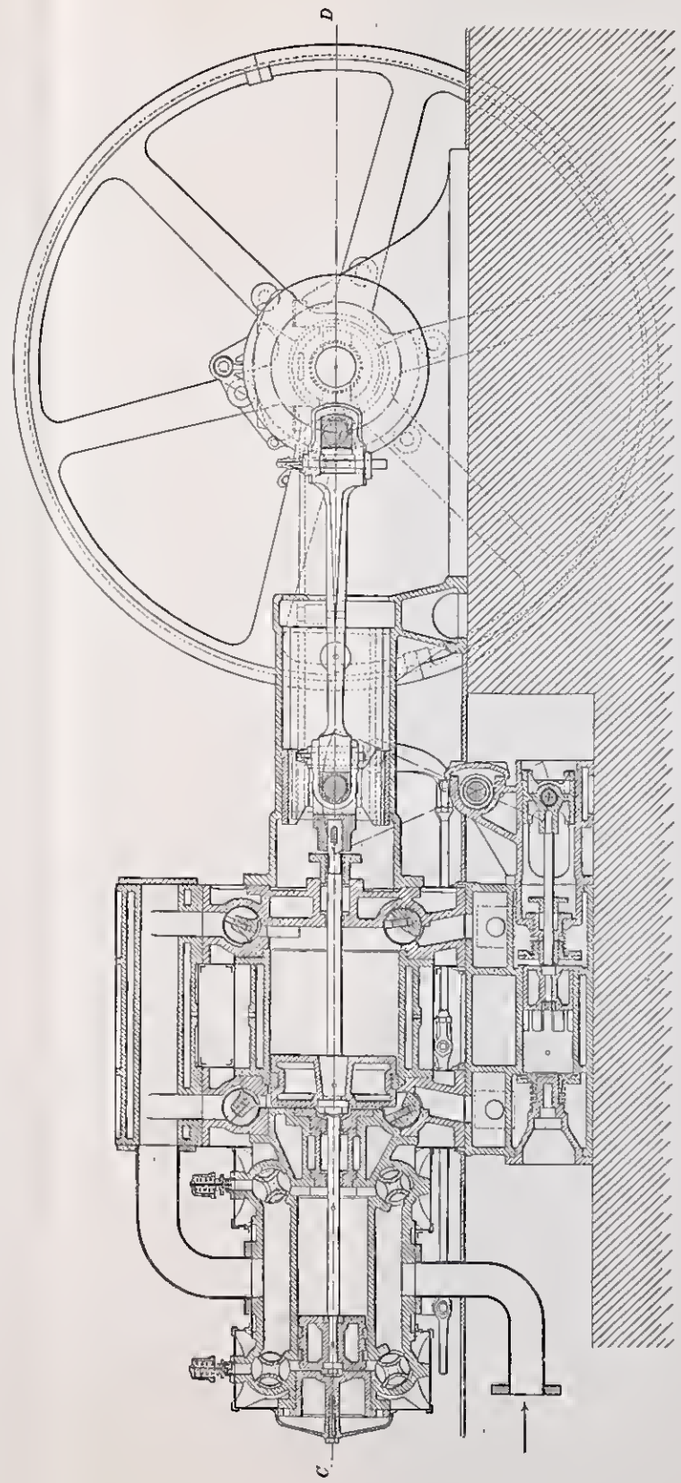
Fig. 130. — Compound-tandem horizontale de Windsor.

de près de 15 mètres; la visite des pistons et le réajustage des segments exigent le démontage complet du cylindre de basse pression.

La machine représentée par la figure 131 est remarquable et originale. Elle a été étudiée par M. Frikart et construite par MM. H. de Ville-Châtel et Cie, de Bruxelles. Ses dimensions sont :

Diamètres des cylindres	220 et 400 millim.
Course	400 —
Nombre de tours par minute	175
Puissance, environ	80 chevx.





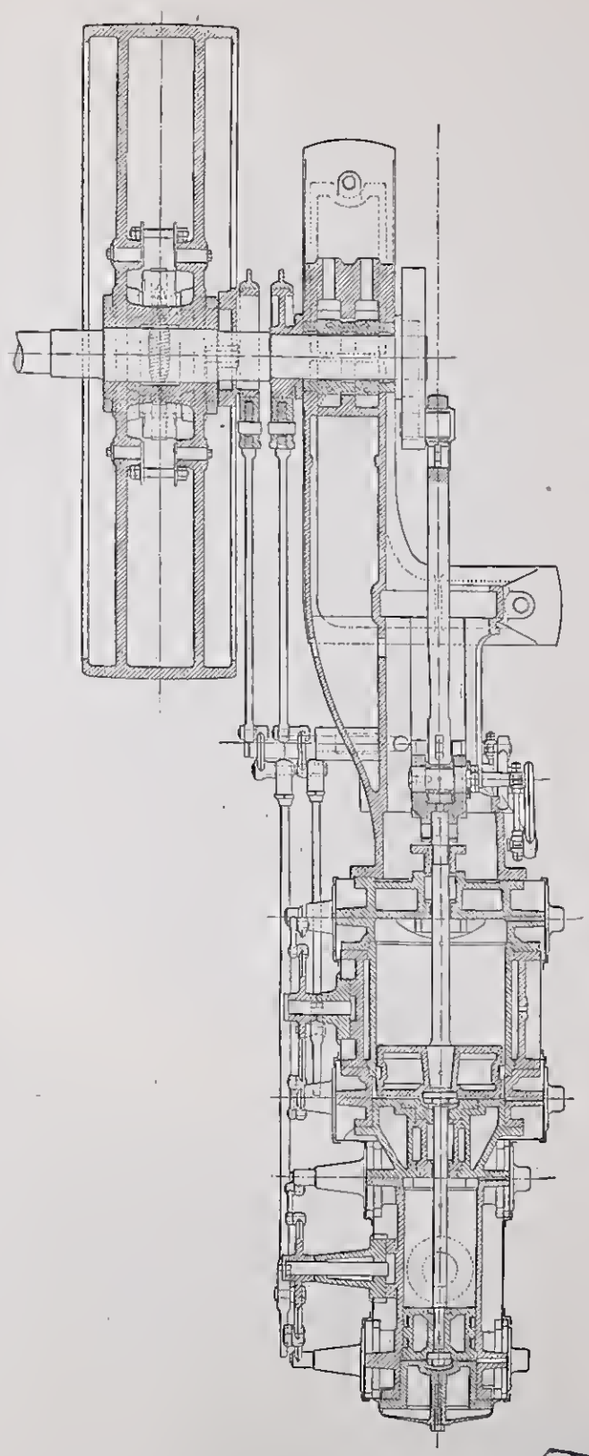


Fig. 131. — Machine compound-tandem, système Frikart, construite par MM. de Ville-Châtel et Cie.

C. F. F

La distribution est nouvelle et intéressante. Au cylindre de haute pression elle est donnée par quatre distributeurs à rotation alternative, qui sont à double orifice. Au point de vue de la largeur des sections offertes à l'écoulement de la vapeur, ils fonctionnent à peu près comme des soupapes à double siège. Au grand cylindre, les distributeurs d'admission sont également à double orifice; ceux d'échappement sont des tiroirs Corliss ordinaires. Les transmissions sont desmodromiques, à rapport variable de vitesses; la commande se fait, pour chaque cylindre, par un excentrique spécial agissant sur une écrevisse.

L'admission est fixe au grand cylindre; elle est variable au petit cylindre par la mobilité de l'excentrique, qui est sous la dépendance d'un régulateur logé dans le volant.

Le petit cylindre est muni d'une enveloppe sèche; le grand cylindre est entouré d'une chemise de vapeur rapportée. Ce dernier repose sur le corps de la pompe à air, laquelle est elle-même boulonnée à la fondation. Quant au petit cylindre, il est en porte à faux; il est assemblé au grand cylindre par une pièce conique, qui forme à la fois les fonds des deux cylindres, et renferme à l'intérieur le presse-étoupe que traverse la tige commune des deux pistons. En déboulonnant cette pièce conique sur ses deux faces, on peut retirer successivement le petit cylindre, puis la pièce conique d'assemblage, et enfin le grand piston, et sa tige, préalablement déclavetée de la crosse.

La pompe à air horizontale est attaquée par un levier prenant son mouvement sur la crosse du piston; elle ne comporte que des clapets de refoulement, le piston fonctionnant lui-même comme distributeur d'aspiration, suivant une disposition qui a été précédemment décrite.

Cette machine, malgré sa complication, mérite d'être étudiée avec soin; elle est compacte, fort bien dessinée et d'une exécution remarquable.

La maison V. Biétrix et Cie, de Saint-Étienne (Loire), a appliqué sur plusieurs ma-

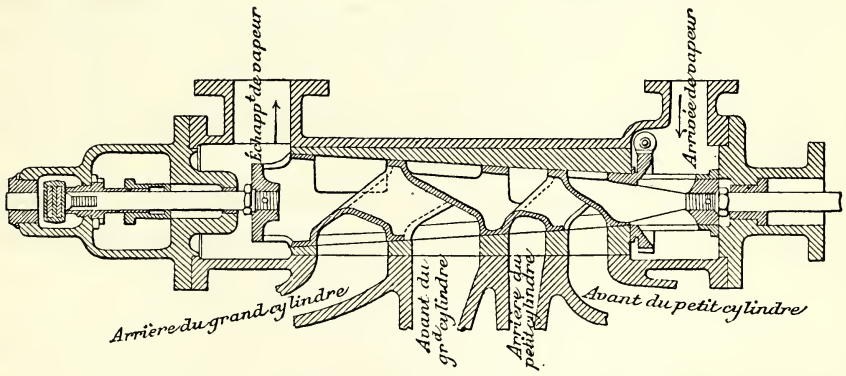


Fig. 132. — Distributeur Biétrix pour machine Compound.

chines en tandem le système de distributeur à rotation continue qui a été décrit plus haut. La figure 132 représente le distributeur en question, tel qu'il est établi pour

C. F. E.

desservir à la fois les deux cylindres d'une machine à détente par échelons. A la rigueur, un dispositif pareil pourrait être rapproché de la détente Woolf plutôt que de la distribution compound, puisqu'il y a déversement direct du petit cylindre dans le grand.

L'une des machines exposées est à deux cylindres et une seule manivelle. L'autre est à quatre cylindres, accouplés deux à deux en tandem, actionnant deux manivelles croisées; un seul distributeur fait le service des quatre cylindres.

Ainsi que nous l'avons fait remarquer, la triple expansion est devenue d'un usage tout à fait général dans les grands appareils moteurs de la navigation maritime. Elle a remplacé la double détente, de la même manière que celle-ci s'était substituée à la détente dans un seul cylindre. Ces transformations successives ont pour cause les sujétions de plus en plus rigoureuses auxquelles les services maritimes sont soumis, et par-dessus tout, les grandes vitesses qu'on leur demande aujourd'hui.

Ces sujétions sont, en général, beaucoup moins étroites dans l'industrie ordinaire, même dans les cas qui semblent très défavorables. Il est bien rare que le coût du combustible ou de la vapeur soit assez élevé pour nécessiter la recherche d'une économie excessive, même au prix de dépenses plus élevées de premier établissement et d'entretien. Aussi l'usage de la triple expansion s'est-il peu répandu dans les usines. Cependant il serait peu prudent de préjuger de l'avenir; de nouveaux éléments peuvent intervenir, ne serait-ce que l'accroissement continu des pressions, et modifier la façon dont la question est posée.

La détente triple se prête à un très grand nombre de combinaisons différentes. Dans les machines marines, on a souvent recours au dispositif suivant : les trois cylindres sont côte à côte, et attaquent un même arbre, par des vilebrequins faisant entre eux des angles égaux; par une répartition convenable des trois moments moteurs, on arrive ainsi à une très grande régularité d'allure. Ce dispositif est beaucoup moins usité à terre; le plus souvent on se contente de deux vilebrequins, et le cylindre de haute pression est monté en tandem derrière l'un des autres cylindres. Les distributions sont presque toujours à commande desmodromique; nous aurons cependant à décrire quelques machines avec commande par déclenchement.

Si les machines à triple expansion n'étaient pas très nombreuses à l'Exposition, du moins les quelques spécimens qui y figuraient étaient presque tous dignes d'une étude attentive.

La magnifique exposition de la Société centrale de construction de machines (Weyher et Richemond), de Pantin (Seine), comportait un grand nombre de machines à vapeur du plus haut intérêt, notamment des exemplaires de ces machines compound horizontales, fixes et demi-fixes, qui ont eu, dans l'industrie, un si grand et si légitime succès. Rappelons que c'est en grande partie à cette société qu'est due l'initiative des applica-

tions du système compound aux machines d'usine; c'est elle également qui a été la première à faire de la triple expansion dans les installations fixes. Pour répondre aux besoins nouveaux, résultant du développement des applications de l'électricité, la Société de Pantin a combiné un type spécial, très compact, très étudié dans ses fonctions et sa construction, doué d'une grande régularité d'allure et d'une consommation fort réduite. La disposition générale est celle d'une compound-pilon, forme marine. Deux systèmes de détente sont appliqués suivant les cas : la détente dans deux cylindres ou la triple expansion.

Nous décrirons en particulier les machines à triple expansion installées dans la station centrale d'électricité de la Compagnie Edison.

Ces machines, au nombre de quatre, représentaient chacune une puissance de 150 chevaux. Chaque machine (fig. 133) comporte quatre cylindres : un cylindre de haute pression, un cylindre de moyenne pression et deux cylindres de basse pression. Les cylindres de haute et moyenne pression sont installés en tandem, chacun au-dessus de l'un des cylindres de basse pression. Les tiges communes à deux cylindres superposés attaquent les deux vilebrequins croisés de l'arbre du volant.

Les dimensions principales sont les suivantes :

Diamètres	du cylindre de haute pression	280 millim.
	du cylindre de moyenne pression	420 —
	des deux cylindres de basse pression	520 —
Course commune des pistons		350 —
Nombre de tours par minute		160
Diamètre des poulies-volants		1,750 millim.
Largeur de jante des poulies-volants		450 —

Dans les expériences auxquelles elles ont été soumises, ces machines ont donné 174 chevaux au frein; la pression à l'admission était de 10 kilogrammes et l'admission de 0,5 au petit cylindre. Dans ces conditions, le coefficient de détente (rapport du volume total des deux grands cylindres au volume à l'admission dans le petit cylindre) est de 1,38.

Aux cylindres de haute et de moyenne pression, la distribution est faite par des tiroirs-pistons, circulant dans des glaces cylindriques à lumières obliques. Au petit cylindre, l'admission a lieu par les lèvres intérieures, l'échappement par les lèvres extérieures; c'est l'inverse au tiroir de moyenne pression. Ces tiroirs sont placés entre les deux cylindres. Aux grands cylindres, la distribution est opérée par des tiroirs plats à doubles lumières, disposés sur le devant de la machine.

Les tiroirs de haute et de moyenne pression sont commandés directement par des excentriques circulaires, calés sur l'arbre de couche; les mêmes excentriques actionnent les tiroirs de basse pression par l'intermédiaire de leviers.

Le régulateur, logé dans l'un des volants, agit sur un papillon.

Les quatre cylindres, formant un ensemble rigide, sont portés par un chevalement

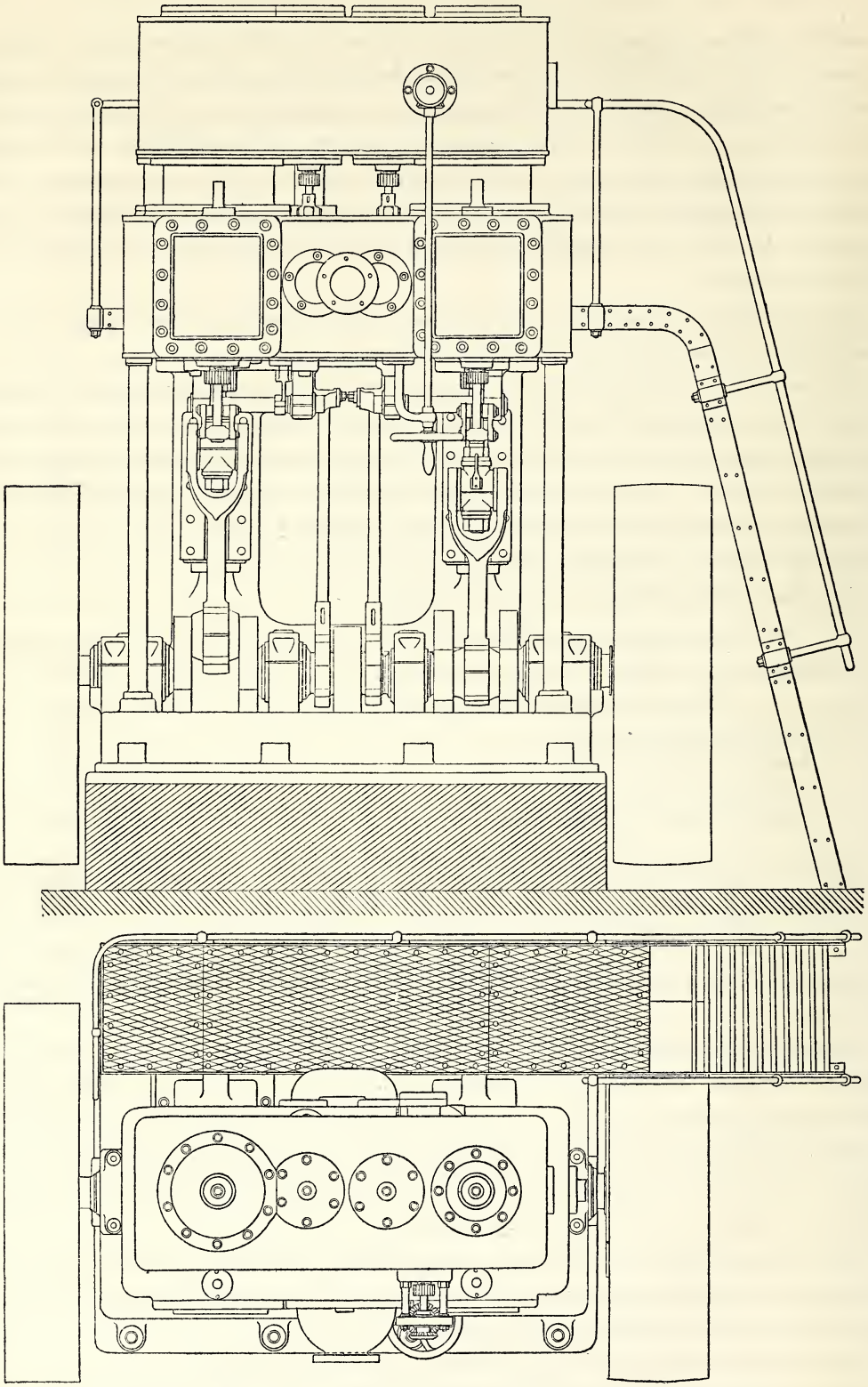


Fig. 133. — Machine compound-pilon à triple expansion, de la Société de Pantin.

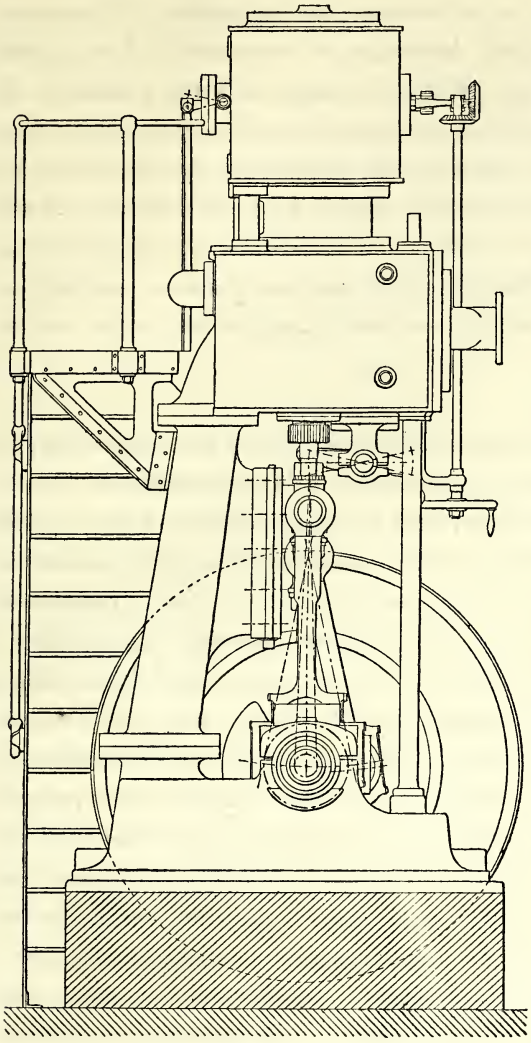


Fig. 133 *bis*. — Machine compound-pilon à triple expansion, de la Société de Pantin.

constitué, en arrière, par deux jambages en fonte creuse, portant les glissières, et en avant, par deux colonnes en fer, qui dégagent bien l'accès du mécanisme. Ces supports s'assemblent sur un socle, qui porte les quatre paliers de l'arbre de couche. Chaque cylindre est venu de fonte avec sa chemise de vapeur.

Le fond supérieur de chacun des cylindres de basse pression porte un appendice cylindrique, sur lequel s'assemble le cylindre superposé et qui forme réservoir intermédiaire. Au passage de la tige des pistons à travers les fonds en regard, des presse-étoupe à serrage élastique assurent l'étanchéité du joint. Des escaliers et passerelles en tôle striée, avec garde-corps, facilitent la visite et l'entretien de tous les organes

La condensation est opérée par un condenseur distinct de la machine, ainsi qu'on le verra ci-après.

Ces machines, d'un aspect simple et satisfaisant, sont agencées de manière à assurer un service régulier et commode; les détails sont extrêmement soignés et l'exécution de premier ordre. Les résultats qu'elles fournissent sont des plus satisfaisants. Dans les essais que nous avons mentionnés plus haut, la consommation de vapeur est descendue au chiffre de 6 kilog. 68 par cheval-heure au frein, soit 6 kilogr. 21 par cheval-heure à l'indicateur, le rendement organique étant de 0,93.

Le service de la force motrice, dans le pavillon de la Compagnie Edison, comportait quatre machines pareilles à celle qui vient d'être décrite, plus une machine pilon à deux cylindres compound; le tout est desservi par deux condenseurs automoteurs du système Weyher et Richemond, appareils ingénieux et éminemment pratiques.

Outre les moteurs installés dans la station d'électricité Edison, la Société de Pantin avait une exposition considérable dans le Palais des Machines : la plupart des types de machines établis par cette maison s'y trouvaient représentés par d'admirables spécimens; on y voyait notamment une machine fixe compound horizontale de 100 chevaux

et des machines monocylindriques de 40 et 25 chevaux, avec régulateur à compensateur du système Denis; plusieurs machines demi-fixes et locomobiles. Une grande machine pilon à triple expansion, du type décrit ci-dessus et d'une puissance de 300 chevaux, donnait le mouvement à l'arbre de transmission de la classe 50. Une chaudière à foyer amovible était installée dans la cour de la force motrice. Enfin les visiteurs s'arrêtaient longuement devant un curieux appareil, de la dimension d'une petite table, et qui donnait le courant à 120 lampes à incandescence, avec une régularité parfaite: c'était le turbo-moteur Parsons, attelé sur une dynamo, merveilleux appareil, qui réalise pour la première fois d'une manière industrielle l'action directe de la vapeur à l'état dynamique.

Passons à l'exposition de M. Joseph Farcot, de Saint-Ouen. Cette ancienne et illustre maison s'est adonnée, depuis un certain temps, à l'étude et à la construction de ces organismes mécaniques, si nombreux, si délicats, dont la marine militaire a besoin pour subvenir aux services variés et difficiles qu'exigent les conditions de la guerre moderne: engins pour la manœuvre et le chargement des grosses pièces d'artillerie, pompes de compression pour l'alimentation des machines hydrauliques, appareils commandant à distance les mouvements du gouvernail, etc. Les navires de guerre sont de véritables usines, munies d'un outillage puissant et compliqué, dont l'étude est du plus haut intérêt pour les mécaniciens; et la maison Farcot, fidèle à ses traditions d'invention, de recherche et d'exécution irréprochable, a contribué, pour une large part, aux progrès de cette industrie nouvelle. Mais ces mécanismes ne ressortent pas à la classe 52, et nous avons l'obligation de passer outre. Nous mentionnerons toutefois, en passant, la machine marine pour yacht ou torpilleur, qui figurait dans l'exposition de M. Farcot, et qui, par ses traits essentiels, se rapproche des moteurs que nous décrivons ci-après.

C'est une machine pilon à triple expansion, donnant 300 à 400 chevaux, avec condenseur par surface; elle est réversible; la distribution est actionnée par un servo-moteur, manœuvrable d'un point quelconque du navire; un régulateur hydraulique, agissant également par l'intermédiaire d'un servo-moteur, maîtrise les emballements, lorsque l'hélice émerge dans les mouvements de tangage.

Les figures 134 et 134 *bis* ci-après représentent les deux machines compound-pilon exposées par M. Farcot. La première est une machine compound à deux cylindres, faisant 80 à 110 chevaux, à une vitesse de 300 tours par minute; les deux cylindres, placés côte à côte, agissent sur deux manivelles rectangulaires.

La deuxième est à triple expansion; à 200 tours, elle donne 150 à 200 chevaux; les trois cylindres sont côte à côte et actionnent trois manivelles à 120 degrés.

Les deux machines sont établies sur les mêmes principes et peuvent être décrites ensemble.

La distribution est opérée par des tiroirs ordinaires, parfaitement équilibrés; à cet effet, leur dos frotte sur une contre-glace réglable, sur laquelle sont reproduites les

lumières de la glace principale, et qui restent en communication permanente avec ces lumières : c'est, sous une autre forme, l'application du principe des tiroirs-pistons. Des ressorts spéciaux amortissent les effets de l'inertie sur ces organes.

La distribution est fixe aux cylindres de détente, et commandée directement par des excentriques fixes. Au cylindre de haute pression, la distribution est variable par le régulateur, et le dispositif adopté pour obtenir ce résultat est des plus intéressants, et caractéristique du système.

L'action du régulateur n'est pas directe; elle s'exerce par l'intermédiaire d'un servo-moteur. Il lui suffit donc d'efforts très minimes pour surmonter les résistances des organes à déplacer, le réglage devient ainsi extrêmement sensible. Le servo-moteur est constitué par un cylindre *A*, parcouru par un piston, sur lequel viennent agir les eaux de purge de la boîte de distribution, transmettant la pression de la vapeur; cette transmission liquide est très efficace pour adoucir la marche de l'appareil et supprimer les flottements qui se produisent sous l'action des fluides élastiques. La rêne *a* du servo-moteur est sous la dépendance du levier coudé *abc*, oscillant autour du point fixe *b*, et recevant en *c* l'action du régulateur *B*.

Voici maintenant comment se produit la variation de la détente : elle est obtenue par une commande analogue à celle de Solms et fort usitée dans la marine. Sur le collier de l'excentrique est fixée une bielle *CD*, dont l'autre extrémité *D* est mobile dans une coulisse *GG*; sur le milieu de la bielle est articulée la tringle *EF* du tiroir; la coulisse peut osciller autour de son centre fixe *H* et, suivant qu'elle est plus ou moins inclinée, l'admission variera dans des limites étendues; on conçoit même qu'il soit possible de renverser la vapeur. Cette variation s'obtient par l'action du servo-moteur *A* sur le levier *HK*, solidaire de la coulisse.

Le tiroir du servo-moteur est disposé de telle sorte, que la chute complète du régulateur ramène la distribution à l'arrêt; de cette façon, on n'a plus à craindre que la machine s'emballe, si le régulateur vient accidentellement à se débrayer. La mise en train se fait par le volant *L*, qui agit en soulevant le régulateur.

La construction est à la fois légère et très soignée; les jambages du bâti et le socle sont venus d'une seule pièce avec les paliers; en avant, les cylindres s'assemblent sur des colonnes en acier. Les cylindres sont revêtus d'une enveloppe sèche. Les pistons sont en acier forgé. La pompe à air est munie de clapets métalliques d'un type spécial; le piston de cette pompe porte une proue conique, qui assure le fonctionnement régulier malgré la grande vitesse de rotation.

La maison Sulzer frères, de Winterthur, expose deux machines à triple expansion, toutes deux munies de la distribution par soupapes équilibrées : l'une a la forme pilon, l'autre est une tandem, d'une construction tout à fait originale; ces deux machines ont été étudiées par M. Wilhelm Züblin, ingénieur en chef de la maison Sulzer, assisté de M. Jürgen Schübeler, premier constructeur pour le département des machines à vapeur.

IMPRIMERIE NATIONALE.

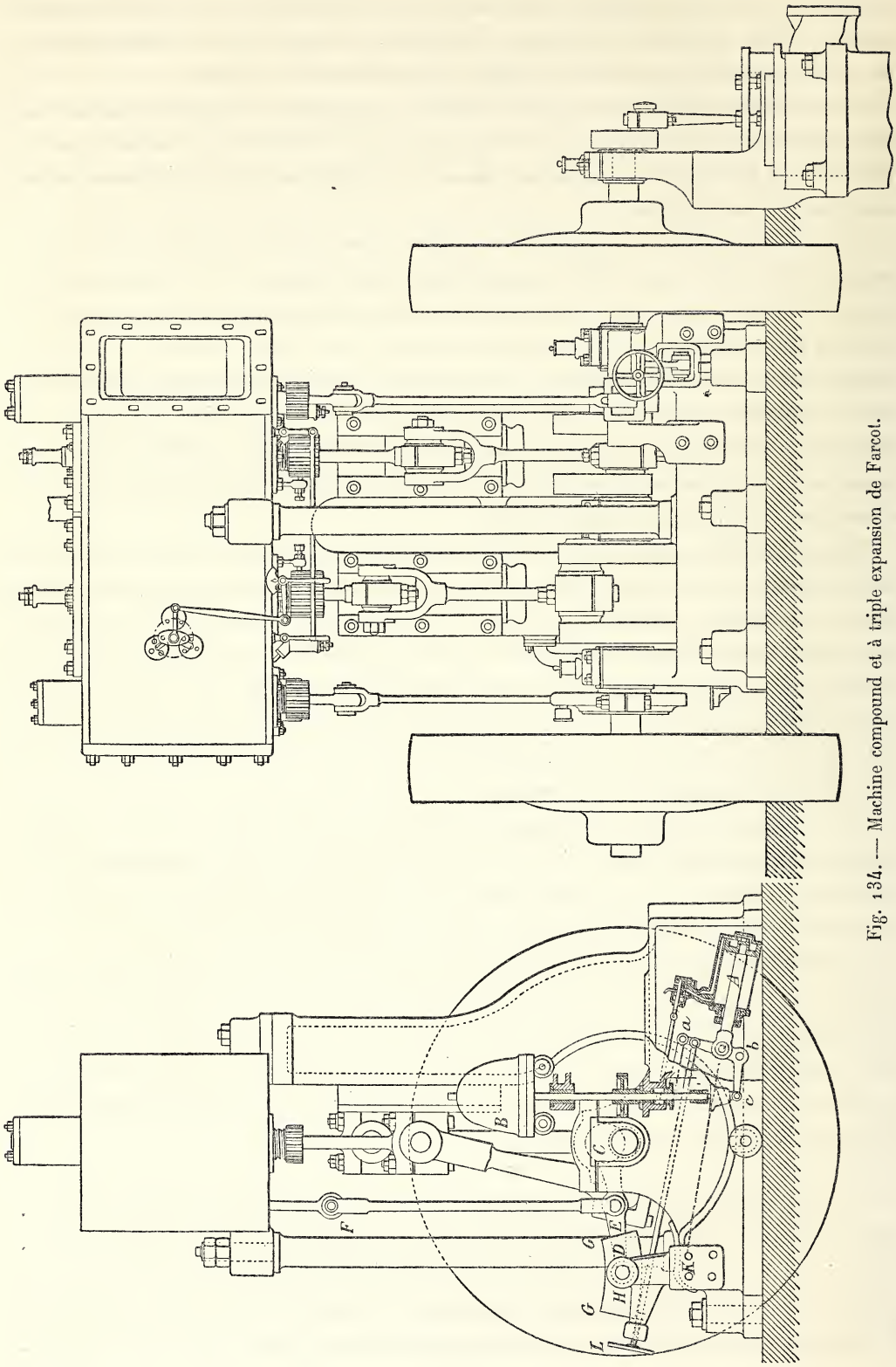


Fig. 134. — Machine compound et à triple expansion de Farcot.

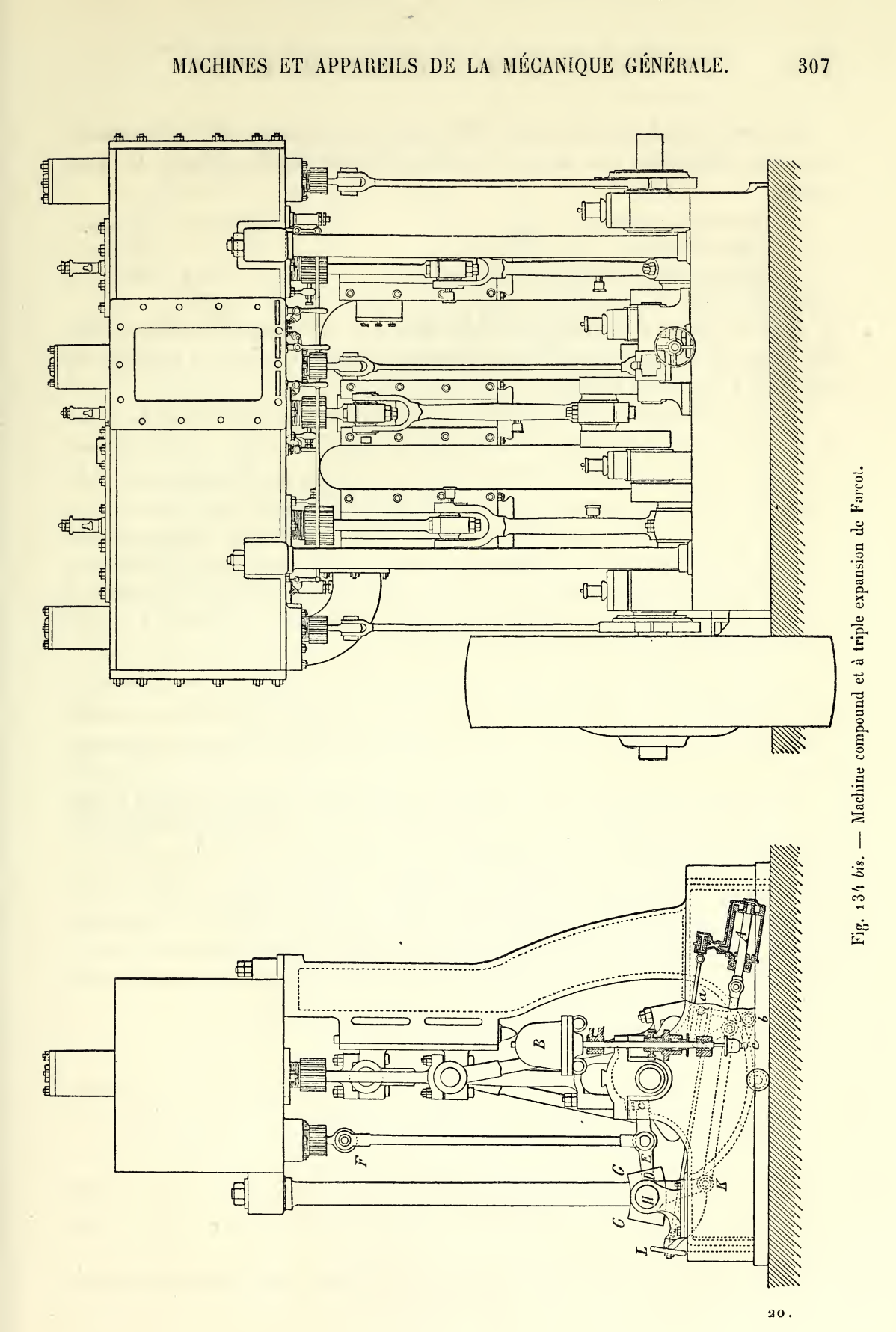


Fig. 134 *bis*. — Machine compound et à triple expansion de Farcot.

Décrivons d'abord la machine pilon. Elle comporte trois cylindres côte à côte, actionnant des manivelles à 120 degrés; le cylindre de haute pression est entre les deux autres.

Diamètres des cylindres	400, 600 et 900 millim.
Course des pistons	600 —
Nombre de tours par minute	100 à 125

Avec une vitesse de 125 tours et de la vapeur à 10 kilogrammes, admise pendant les 40/100 de la course du petit piston (coefficient de détente 12,7), la puissance est d'environ 435 chevaux indiqués.

Chaque cylindre est muni de ses quatre soupapes, deux pour l'admission, deux pour l'échappement. Les deux soupapes d'admission au cylindre de haute pression sont commandées par une transmission à déclenchement sous l'action du régulateur; grâce à la faible levée de ces soupapes et à quelques précautions prises pour atténuer les chocs, ce système fonctionne bien, même à la vitesse de 125 tours par minute. Les soupapes des autres cylindres sont actionnées directement, au moyen de cames fixes, par l'arbre de distribution; cet arbre prend son mouvement par engrenages sur l'arbre de couche; il est horizontal et court parallèlement au plan général des axes des cylindres. Le graissage est desservi par une petite pompe rotative, qui puise dans un réservoir où se réunissent les huiles s'écoulant des divers points de la machine, et les répartit par une canalisation aux surfaces frottantes; les cames de l'arbre de distribution viennent plonger dans une gouttière pleine d'huile, faisant partie de la canalisation de graissage.

Le succès des machines à triple expansion a amené MM. Sulzer à appliquer le système à des machines d'usine de moyenne puissance; ils se sont proposé d'écarter la multiplicité des organes de transmission et de distribution; cette recherche les a amenés au dispositif original représenté par la figure 135. C'est une machine en tandem, dans laquelle le piston *A* de haute pression ainsi que le piston *B* de pression moyenne travaillent à simple effet, tandis que le piston *C* de basse pression travaille à double effet par ses tranches annulaires. Ces trois pistons forment un ensemble solide et agissent, par une transmission unique, sur l'arbre à manivelle.

Les dimensions sont les suivantes :

Diamètres des pistons	350, 525 et 700 millim.
Course des pistons	750 —
Nombre de tours par minute	85 à 100

Avec une pression de 10 kilogrammes, une admission de 0,40 a petit cylindre et une vitesse de 85 tours, la puissance développée est d'environ 140 chevaux indiqués.

La distribution est donnée par des soupapes équilibrées; les cylindres de haute et

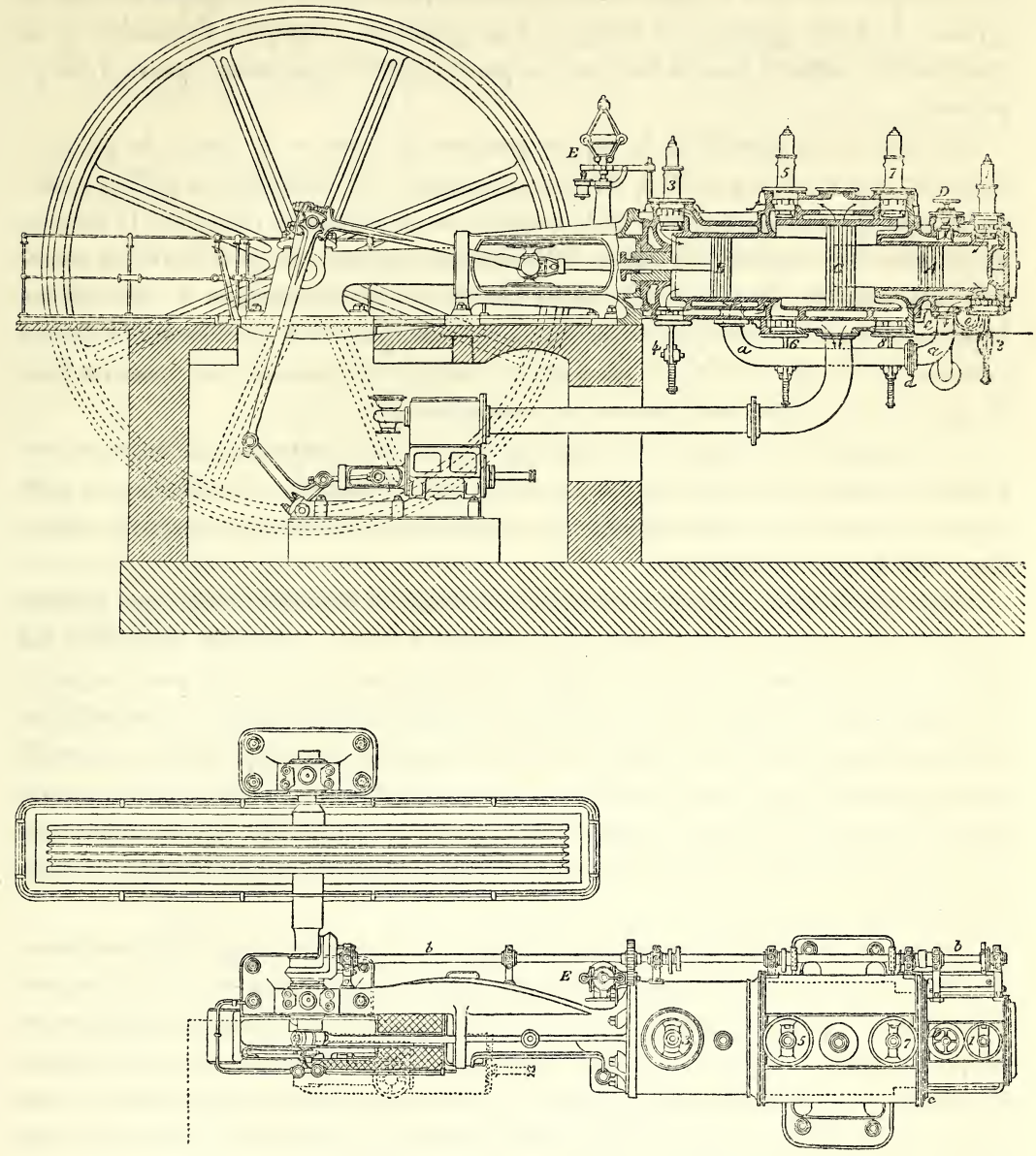


DIAGRAMME DES MOMENTS MOTEURS.

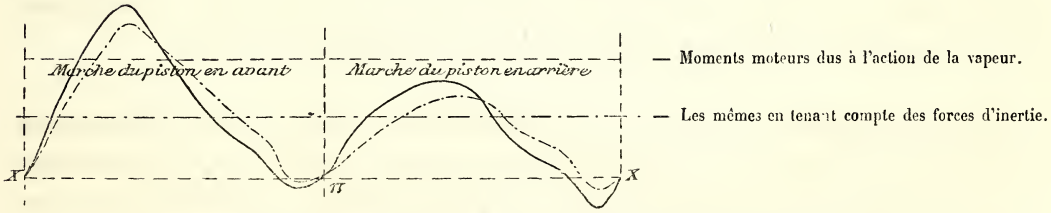


Fig. 135. — Machine tandem à triple expansion de Sulzer frères.

moyenne pression étant à simple effet ne portent qu'une paire de soupapes chacun; le cylindre de basse pression est muni de deux paires de soupapes; l'ensemble de la distribution comporte donc en tout huit soupapes, quatre d'admission, quatre d'échappement.

Au sortir de la chaudière, la vapeur parcourt la chemise de vapeur du petit cylindre *A*; la prise de vapeur *D* la dirige vers la soupape 1 d'admission au petit cylindre; par la soupape d'échappement 2 et la conduite *aa*, la vapeur se rend dans la chemise du cylindre *B* de moyenne pression, cette chemise formant avec la conduite *aa* réservoir intermédiaire. La vapeur est reprise par la soupape d'admission 3; elle agit sur le piston *B*, puis est renvoyée par la soupape d'échappement 4 à la chemise du grand cylindre; de là, elle est dirigée, par les deux soupapes d'admission 5 et 7, sur les faces du piston *C*, pour être enfin évacuée au condenseur par 6 et 8.

La commande des soupapes est faite par l'arbre de distribution *bb*, engrené avec l'arbre du volant; elle s'opère par cames fixes, sauf la soupape 1 d'admission au petit cylindre, laquelle est commandée par une transmission à déclenchement, avec admission variable par le régulateur.

Les proportions des organes sont établies de manière à réaliser autant que possible l'égalité des travaux moteurs développés pendant les deux excursions successives des pistons. Les diagrammes joints à la figure 135 montrent jusqu'à quel point ce but a été atteint. Dans ces diagrammes, les abscisses sont les arcs décrits par la manivelle, les ordonnées sont les moments moteurs; les aires comprises entre les courbes et l'axe *XX* représentent les travaux moteurs; deux courbes ont été tracées : l'une (en traits pleins) donne les moments moteurs résultant de la pression seule de la vapeur, l'autre (en traits mixtes) les mêmes moments corrigés de l'influence de l'inertie des organes de la transmission.

L'arbre *bb* commande le régulateur *E* et une petite pompe assurant la circulation de l'huile dans tous les frottements. Des précautions particulières ont été prises pour faciliter le démontage : il suffit, pour visiter les pistons, de défaire le joint boulonné *cc* du petit cylindre, ainsi que le joint *d* du tuyau de communication; le petit cylindre devient libre et peut être retiré en arrière, porté sur les galets *ee* qui roulent sur des rails, et sans qu'il soit nécessaire de toucher en rien aux pièces de la distribution. En déclavetant ensuite la crosse, on peut retirer sans difficulté les trois pistons.

Telle est cette singulière machine, qui a vivement excité la curiosité; l'exécution en était excellente, comme celle des autres objets exposés par M. H. Sulzer. Actuellement c'est à l'expérience à montrer la valeur pratique de cet ingénieux système.

M. Thomas Powell, de Rouen, exposait une machine à triple expansion, qui mettait en mouvement une section de la transmission générale dans le Palais des machines. Ce moteur est horizontal; il est constitué par quatre cylindres, attelés deux à deux en tandem sur deux manivelles à 90 degrés, comprenant entre elles le volant.

Les dimensions principales sont données ci-après :

Diamètres des cylindres.	N° 1	280 millim.	en tandem.
	N° 2	470 —	
	N° 3	400 millim.	en tandem.
	N° 4	510 —	
Course commune des pistons		900 —	
Nombre de tours par minute		60	

Les cylindres n°s 2 et 4 sont en arrière des n°s 1 et 3. En service normal, la vapeur admise dans le n° 1 se détend d'abord dans le n° 3 ; puis elle agit simultanément sur les pistons 2 et 4. On remarquera que les quatre cylindres sont tous de diamètres différents ; le motif qui a amené le constructeur à cette disposition un peu insolite est le suivant : en cas d'avarie ou de réparation, on peut continuer à faire le service avec l'un ou l'autre des groupes de deux cylindres en tandem, fonctionnant comme machine compound. La distribution se fait par tiroirs circulaires, assez analogues, comme agencement, aux tiroirs Wheelock, avec déclenchement gouverné par le régulateur ou cylindre d'admission. L'appareil de déclenchement est une variante du système Correy, appliqué depuis longtemps par la maison Powell aux machines à balancier qu'elle construit.

Mentionnons enfin une petite machine à triple expansion, composée par M. Guillaume Rebourg, chef des études de la maison Boulet et Cie, de Paris. Elle se compose de trois pistons à simple effet agissant sur une même manivelle ; le tout est disposé verticalement dans une enveloppe au haut de laquelle se trouve l'arbre du volant. L'ensemble est fort compact et tient très peu de place.

Les machines fixes qui figuraient à l'Exposition présentaient, ainsi qu'on a pu s'en rendre compte par les descriptions qui précèdent, de nombreuses variétés dans leurs types et leurs agencements. Quant aux organes élémentaires, leur diversité était beaucoup moins grande ; il semble que, d'une Exposition à l'autre, la technique des détails tende à se fixer et à se perfectionner, beaucoup plus qu'à se transformer. Tout au plus trouve-t-on à glaner quelques organes nouveaux, différant, soit par leur objet, soit par leurs dispositions, de ceux usités jusqu'alors. Nous allons en indiquer quelques-uns.

Les condenseurs en particulier et leurs pompes à air ont fait l'objet de quelques inventions intéressantes. Suivant que besoin est, on n'hésite plus aujourd'hui à donner aux pistons des pompes à air des vitesses qui eussent paru naguère inabordables : on en a vu plus haut de nombreux exemples, surtout dans la description des machines à allure rapide. La chose n'est pas sans présenter de sérieuses difficultés, qu'on n'a pu surmonter qu'à force de recherches patientes. Les fluides qui remplissent le condenseur ont un écoulement assez lent et pénible. L'eau chaude mélangée d'air et de vapeur n'est soumise, dans le condenseur, qu'à une pression très faible ; le vide produit par

la pompe à air ne l'attire qu'imparfaitement. Divers artifices sont employés. L'un des plus ingénieux consiste à pomper séparément l'air par le haut et l'eau par le bas du condenseur, au moyen de deux pompes spéciales, chacune construite en vue du but à atteindre; on évite ainsi le barbotage qui gêne beaucoup l'écoulement des deux fluides. Souvent aussi on façonne le piston en forme de cône, de telle sorte qu'il divise le fluide et éprouve moins de résistance dans ses mouvements. Mais le procédé le plus en usage consiste à donner aux orifices une très grande section et à les couvrir de clapets très légers et très mobiles. Les clapets en caoutchouc sont encore les plus en usage, quoique l'on reproche au caoutchouc d'être cher et de s'altérer assez promptement dans les eaux grasses, surtout s'il n'est pas de toute première qualité. La matière appelée *fibre vulcanisée* commence à être fort employée; on la trouve dans le commerce sous divers aspects, et notamment sous la forme de feuilles souples et assez minces, qui font de bons clapets de condenseur. Les lames métalliques flexibles ont été proposées. L'usage des clapets américains s'est répandu : ils sont formés d'un disque métallique très léger, pressé sur son siège par un ressort très flexible; ils sont d'assez faible diamètre, et on en juxtapose un grand nombre pour obtenir la section voulue.

Dans les grandes stations d'électricité, la Société centrale de construction de machines, de Pantin (Seine), emploie d'ordinaire un appareil de condensation spéciale, qui dessert, par des conduites, toutes les machines de l'usine. Ce *condenseur automoteur* se compose d'une cloche à condensation et d'un petit cheval actionnant une pompe à air; l'appareil est simple, rustique et d'un jeu assuré. Ce dispositif présente de sérieux avantages; il supprime toutes les difficultés que soulève la commande directe de la pompe à air par un moteur à allure rapide; il simplifie considérablement la machine motrice et la débarrasse d'organes délicats et encombrants; à la mise en marche, il permet le départ immédiat et sans hésitation.

MM. John Kirkaldy, de Londres, ont présenté également un condenseur, muni de sa pompe à air actionnée par un moteur spécial. C'est un appareil marin : le condenseur par surface est constitué par un faisceau de tubes; il a pour objet principal de fournir de l'eau distillée, soit pour l'alimentation des chaudières, soit comme eau potable. La chaleur est fournie par la vapeur d'échappement des machines motrices.

La condensation par surface, qui a amené une transformation si profonde de la navigation maritime, a été longtemps réservée aux appareils marins. Dans ces dernières années, il en a été fait des applications aux machines fixes. C'est dans les cas où l'eau est chère ou impure.

Si l'on ne dispose que d'eaux impures, les conditions sont à peu près les mêmes que pour les machines marines : il s'agit d'obtenir par distillation de l'eau pure pour l'alimentation des générateurs.

L'eau est assez souvent rare et chère, soit qu'il faille la puiser à de grandes profondeurs et au moyen de travaux coûteux, soit qu'on doive l'emprunter aux canalisations urbaines. Dès lors, il devient impossible de s'en servir comme corps refroidissant pour la condensation de la vapeur d'échappement; il peut même devenir utile de pousser plus loin encore l'économie et de réduire la quantité d'eau nécessaire pour l'alimentation des chaudières.

Dans de telles circonstances, la condensation par surface résout le problème; seulement, au lieu de refroidir le condenseur par de l'eau, on se sert de l'air.

L'*aéro-condenseur* de M. Frédéric Fouché, de Paris, est fondé sur ce principe. Il est constitué (fig. 136) par un faisceau de tubes parcouru par la vapeur d'échappement, et renfermé dans une caisse que traverse un courant d'air actif produit par un ventilateur. La vapeur se condense dans les tubes, et l'eau de condensation, distillée et pure, est ramenée à la chaudière. La solution est complète, puisque, à part les pertes, c'est toujours la même eau qui sert indéfiniment. Quant à l'air échauffé par son passage sur les tubes, on peut, dans bien des cas, l'utiliser pour le chauffage ou le séchage.

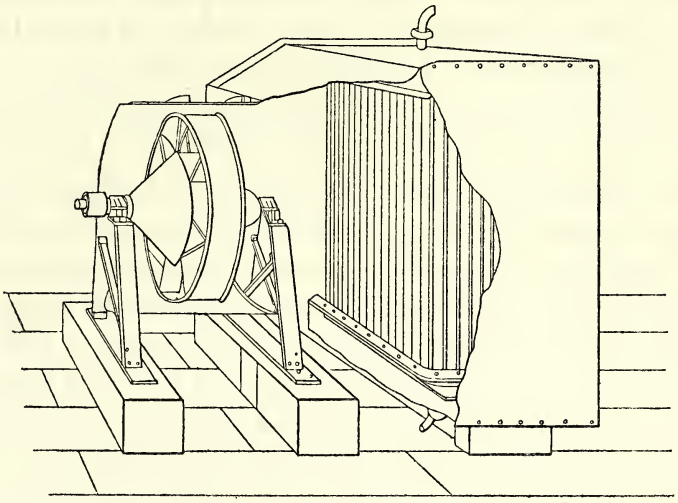


Fig. 136. — Aéro-condenseur Fouché.

Cette solution comporte néanmoins un inconvénient grave : la vapeur d'échappement est mélangée des graisses qui ont servi à la lubrification des organes; il faut s'en débarrasser, sans quoi, ces graisses s'accumuleraient indéfiniment dans les appareils, dont elles ne tarderaient pas à paralyser le fonctionnement, tout en faisant courir au générateur les graves dangers qui résultent de l'alimentation à l'eau grasse. Pour échapper à cette difficulté, M. Fouché dispose sur le parcours du tuyau d'échappement l'appareil représenté figure 137. C'est une surface hélicoïdale, en forme de vis à filets carrés, enveloppée par une toile métallique; la giration imprimée à la vapeur produit un essorage, qui a pour effet de séparer les gouttelettes d'eau grasse mélangées à la vapeur.

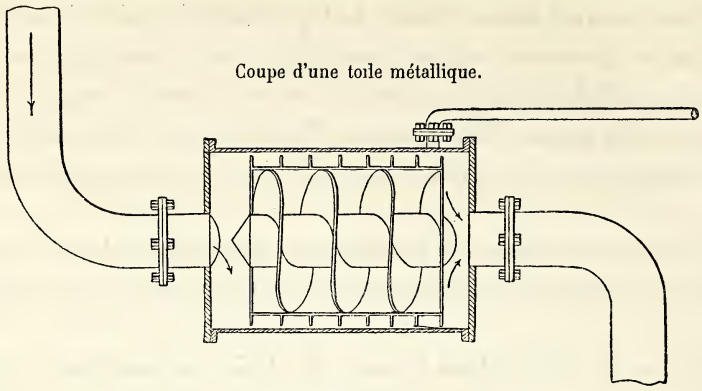


Fig. 137.

La vapeur en se condensant dégage beaucoup de chaleur; l'air, au contraire, en emporte peu; pour produire des effets importants, il faut de grands volumes d'air et des surfaces refroidissantes très étendues. Une autre solution a été appliquée dans plusieurs cas : elle consiste à utiliser le froid que donne l'évaporation de l'eau, évaporation activée au besoin par un courant d'air. Certaines usines emploient, depuis nombre d'années, ce procédé : la vapeur d'échappement est envoyée dans un jeu de tuyaux exposé au grand air, et constamment arrosé à l'extérieur par de l'eau en pluie.

Dans ces derniers temps, par suite du développement qu'ont pris les industries installées dans les villes, où l'eau est toujours chère et difficile à se procurer en abondance, la question est devenue plus pressante; elle a été étudiée de divers côtés. La solution à laquelle plusieurs constructeurs se sont arrêtés est la suivante : la condensation est faite par mélange; l'eau chaude sortant du condenseur est envoyée au sommet d'un château d'eau et s'écoule en pluie; elle rencontre dans son parcours des diaphragmes, des fascines, des filets ou autres obstacles destinés à ralentir sa chute et à multiplier les contacts; elle est léchée par un courant d'air obtenu, soit par tirage naturel, soit à l'aide d'un ventilateur; elle se refroidit par évaporation partielle et par contact avec l'air, et se réunit dans une bâche, d'où, après dégraissage, elle est renvoyée au condenseur et à la chaudière. La solution est théoriquement moins parfaite que celle donnée par l'aérocondenseur; mais elle n'exige que des appareils simples, peu coûteux et modérément encombrants. La quantité d'eau perdue par évaporation est en général assez petite, moindre, toutes choses égales, que ce que consommerait une machine à échappement libre. Divers constructeurs ont établi des appareils de ce genre, qui donnent toute satisfaction.

Citons, entre autres, MM. Chaligny et Cie, de Paris, ainsi que M. Weidknecht, de Paris, lequel exposait un condenseur à eau régénérée étudié par M. Grangé.

SECTION III.

MACHINES LOCOMOBILES, MI-FIXES ET DIVERSES.

SOMMAIRE.

Objet et division.

Locomobiles et machines mi-fixes. — Dispositions générales des locomobiles. — Dispositions générales des machines mi-fixes. — Locomobiles et mi-fixes de Weyher et Richemond, de Chaligny, de Boulet, de Biétrix, de Dandoy-Mailliard, de Bérendorf, d'Albaret, de la Société de Vierzon, de Damey, d'Olry et Granddemange, de Weidknecht, de la Société alsacienne, de Pécard, de Davey-Paxmann, d'OErlikon, de la Société suisse.

Moteurs à vapeur domestiques de Baxter, de Friedrich de Hathorn-Davey, de Serpollet.

Machines à vapeur à simple effet de Brotherhood, de Burgin, de Brown, de Westinghouse.

Machines de Bonjour, de Montrichard.

Machines rotatives de Taverdon, de Bornet, de West, de Nègre, de Jésupret.

Turbo-moteur de Parsons.

Servo-moteur de Farcot.

Dans la précédente section, nous avons étudié les machines à vapeur fixes. Nous allons nous occuper maintenant des locomobiles et des machines mi-fixes; nous terminerons par la description de certaines machines d'un type exceptionnel, et dont les dispositions s'écartent de celles ordinairement adoptées pour les moteurs à vapeur.

La fabrication des locomobiles a pris beaucoup de développement dans ces dernières années; pour tous les travaux qui demandent un peu de puissance mécanique, on prend de plus en plus l'habitude de remplacer le manège à cheval ou le moulin à vent par cet outil commode, qui ne mange pas quand il ne travaille pas, qui ne consomme, quand il travaille, qu'un peu de charbon et d'huile, qui est toujours prêt au moment où l'on en a besoin et à l'endroit où l'on réclame ses services.

Parmi les nombreuses industries qui font un usage courant de la locomobile, il faut citer, en premier lieu, l'agriculture, où elle remplit les emplois les plus variés : battage du blé, découpage des rations, labourage et façonnage du sol, etc.; les entreprises de construction, soit des édifices, soit des ouvrages publics, se servent de la locomobile dans un très grand nombre d'opérations : fabrication du mortier, épuisements, élévation des matériaux, cassage des pierres, exécution des terrassements, etc. Enfin, depuis quelques années, la submersion des vignes phylloxérées se fait sur la plus vaste échelle à l'aide de locomobiles, et d'importantes industries ont été créées pour cet objet.

L'Exposition comportait beaucoup de locomobiles; mais la plupart de ces engins étaient destinés à des usages spéciaux : agriculture, sauvetage, génie civil, etc.; de sorte qu'il n'en restait, en somme, qu'un nombre assez restreint ressortissant à la mécanique générale; cette partie de la classe 52 était un peu secondaire, et nous n'aurons pas à y insister longuement.

Fort peu de nouveautés, d'ailleurs, sont à signaler sur cette matière. Les types, les formes, les détails même de cette machine rustique sont arrêtés, fixés et exécutés sans changements notables. Les locomobiles se fabriquent, comme une marchandise courante, par des ateliers de tous ordres. Les bonnes maisons se font un honneur de ne livrer que des machines excellentes, bien étudiées, soigneusement construites, susceptibles de fournir un service régulier, sûr et économique. D'autres constructeurs sont moins scrupuleux et, pour attirer la clientèle, n'hésitent pas à livrer à bas prix des locomobiles de médiocre qualité : c'est le sort commun à tous les produits d'un usage courant et commercial; et la chose n'aurait d'autre inconvénient que de faire payer un peu cher, aux acheteurs maladroits, les services d'un outil à trop bon marché, si cet outil était toujours inoffensif. Malheureusement, il n'en est pas ainsi; une locomobile mal construite est une cause de danger pour ceux qui s'en servent et même pour ceux qui s'en approchent. Les locomobiles causent chaque année des accidents, parfois très graves et, toute proportion gardée, beaucoup plus nombreux que ceux occasionnés par les appareils fixes et les locomotives. Et l'on s'étonne même que ces accidents ne soient pas plus fréquents encore, quand on examine certaines locomobiles, établies en dépit des règles les plus élémentaires de la bonne construction, quand on considère que ces machines, après avoir été plusieurs fois vendues, revendues, réparées à tort et à travers, tombent souvent entre des mains brutales et ignorantes. La surveillance administrative, qui pourrait tout au moins atténuer les chances d'accident, est ici particulièrement inefficace; l'exercice en est rendu fort difficile, à cause du grand nombre et de la mobilité des appareils; et d'autre part, il ne paraît pas que les règlements en vigueur se soient autrement préoccupés des dangers particuliers que présentent ces machines, qui cependant ont fait si tristement leurs preuves.

La plupart des locomobiles s'établissent sur un type à peu près uniforme (fig. 138). La chaudière est horizontale, tubulaire, de la forme locomotive ou à foyer amovible; les tubes sont en fer ou en laiton; le tirage est activé par l'échappement. La machine, horizontale et à connexion directe, repose sur le dos de la chaudière par des patins percés de trous ovales pour la dilatation; l'arbre à vilebrequin tourne dans deux paliers venus avec le bâti, et reçoit une ou deux poulies-volants en porte à faux. La distribution est généralement simple et se fait par un tiroir en coquille, conduit par un excentrique circulaire. Le régulateur agit sur un papillon. Tout le système est porté sur quatre roues en fer, les deux roues d'avant formant avant-train, mobile autour d'une cheville ouvrière et muni de brancards. Pendant les déplacements, la cheminée en fer se démonte ou se rabat en tournant sur une charnière.

Ces dispositions sont de beaucoup les plus en usage. Elles comportent, suivant les cas, quelques variantes. Dans les locomobiles anglaises, le bâti est souvent supprimé, et le cylindre d'une part, les paliers de l'autre sont fixés sur le corps de chaudière. Quelques constructeurs, pour les faibles puissances, se servent d'une chaudière verti-

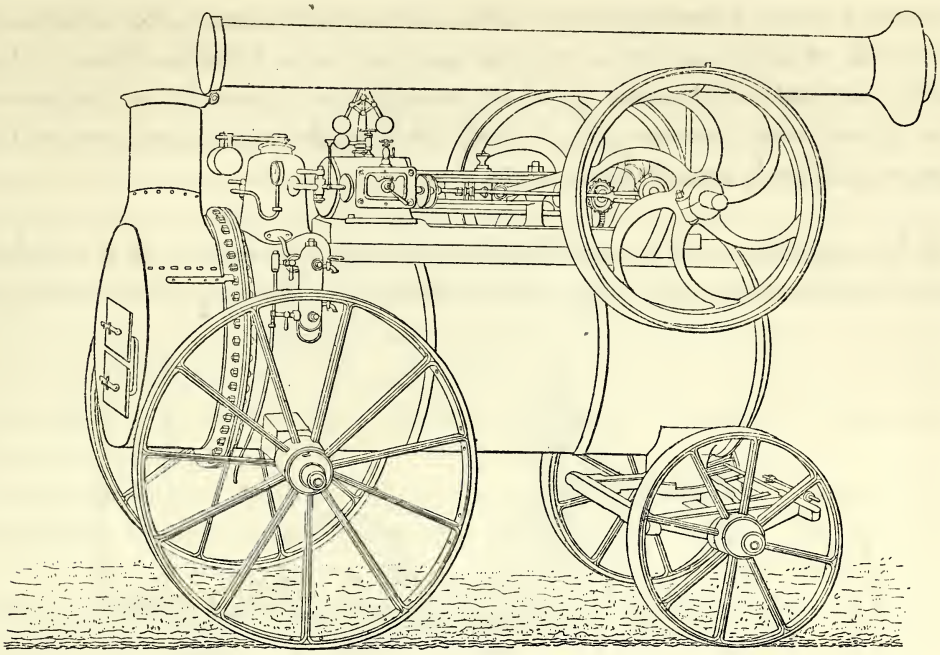


Fig. 138. — Locomobile.

cale, plus ou moins analogue à la chaudière Field, avec une machine également verticale.

Pour les fortes locomobiles, on a souvent recours à des dispositifs un peu plus perfectionnés : l'économie de la vapeur devient alors une question importante à considérer; ce n'est pas que les dépenses de combustible jouent ici un rôle prépondérant; mais une machine médiocre, consommant beaucoup de vapeur, exigerait une chaudière puissante et par conséquent lourde, ce qui ferait perdre à l'appareil son caractère de mobilité. La distribution employée en pareil cas permet une détente prolongée, et elle est ordinairement variable à la main ou par le régulateur. Souvent la machine est à deux cylindres accouplés, parfois avec changement de marche; cette disposition est généralement appliquée aux locomobiles routières. De là à la double expansion il n'y avait qu'un pas; il a été franchi et l'on a vu, dans ces derniers temps, apparaître la locomobile compound. C'est peut-être aller un peu vite; les locomobiles, même celles à deux cylindres, sont à échappement libre, et sans la condensation, la détente multiple perd beaucoup de ses avantages.

Il n'est pas inutile de rappeler ici que ce fut Calla qui importa en France la construction des locomobiles. La maison Calla, un des plus anciens établissements mécaniques de notre pays (il fut fondé en 1788 par Calla père), a contribué pour une large part au développement des procédés de la grande industrie moderne. Calla père se procurait les modèles des meilleures machines anglaises, et les exécutait dans ses ateliers. C'est ainsi qu'il put fournir à nos industriels des machines de filature, des

machines à vapeur à haute pression (1825), des machines-outils, etc. Son fils, qui lui succéda en 1834, le suivit dans cette voie; en 1852, il établit, d'après les types anglais, la première locomobile qui ait été construite en France, et, en quelques années, il avait créé toute une série de types de locomobiles. L'ancienne maison Calla porte aujourd'hui le nom de Chaligny et Cie.

Si l'on supprime ou qu'on immobilise les roues d'une locomobile, on la transforme en une machine mi-fixe (fig. 139). Cette transformation s'est faite pour ainsi dire d'elle-

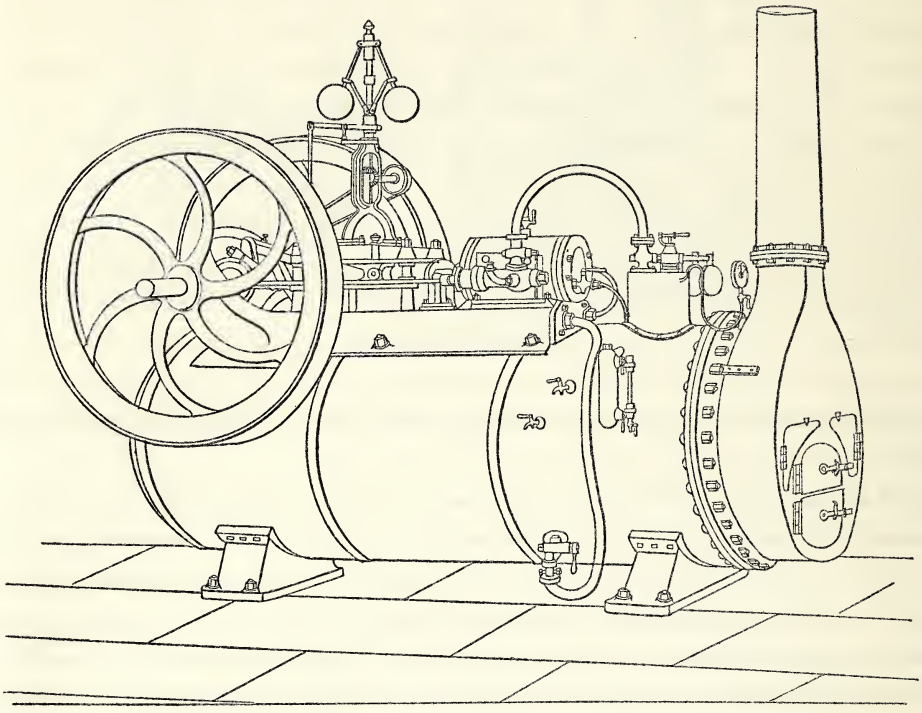


Fig. 139. — Machine à vapeur mi-fixe.

même, dans nombre de cas où le service d'une locomobile a dû être prolongé dans des proportions primitivement imprévues. Puis les avantages de ce genre d'installation s'étant révélés par l'expérience, les constructeurs se sont mis à fabriquer des machines mi-fixes; ces avantages peuvent être fort sérieux dans certaines applications : une machine mi-fixe est moins encombrante qu'une machine fixe; elle exige moins de fondations, moins de tuyauterie, souvent moins de personnel; de plus, dans les industries, aujourd'hui si nombreuses, qui sont exposées à subir des remaniements fréquents, la mi-fixe peut, presque sans frais, se déplacer d'un point à l'autre d'une usine, ou être revendue sans grande perte et remplacée par une autre plus puissante. Ce sont là des facilités qui sont loin d'être négligeables; aussi l'usage de ces moteurs s'est-il beaucoup répandu.

Pendant assez longtemps, les machines mi-fixes sont restées à leur état primitif, ne différant des locomobiles que par leur mode d'appui sur le sol. Cependant, dans plusieurs ateliers, on avait été amené à leur donner plus de puissance, et même à leur ajouter un condenseur, ce qui procurait le double avantage d'économiser le charbon et de réduire la puissance et le volume de la chaudière. MM. Weyher et Richemond entrèrent résolument dans cette voie : la machine mi-fixe qu'ils exposaient en 1878 développait plus de 100 chevaux; non seulement elle était à condensation, mais elle comportait deux cylindres compound. Cette machine eut un grand succès : elle s'adaptait merveilleusement à une foule d'applications, où l'installation d'une chaudière et d'un moteur distinct eût soulevé de sérieuses difficultés. Cet exemple a été suivi par d'autres constructeurs, et plusieurs mi-fixes, établies sur des données analogues, figuraient à l'Exposition de 1889.

La machine mi-fixe comporte, cela va sans dire, des variétés plus nombreuses que la locomobile, comme formes et dispositions des organes.

Décrivons rapidement quelques-unes des expositions qui comportaient des machines locomobiles et mi-fixes.

Nous passerons d'abord en revue les constructeurs français, en tête desquels il est de toute justice d'inscrire MM. Weyher et Richemond [*Société centrale de construction de machines, à Pantin* (*Seine*)]. L'exposition de cette maison était fort importante. On y trouvait d'abord une locomobile de 15 chevaux, montée sur chaudière à foyer amovible, avec régulateur à compensateur du système Denis et réchauffeur alimentaire par la vapeur d'échappement. Plusieurs machines mi-fixes étaient exposées, se rapprochant, par leurs dispositions, du type que nous avons décrit plus haut et de puissance variable entre 25 et 100 chevaux. Mentionnons, en particulier, une mi-fixe d'une constitution intéressante : la chaudière est à petits éléments, du type *Belleville;* la machine est verticale, accolée à la chaudière et constituée par deux cylindres compound; la vapeur d'échappement active le tirage; la puissance de ce moteur est de 20 chevaux. L'ensemble est fort léger; il peut s'installer sur roues, ou bien se démonter en parties de poids modéré, ce qui facilite singulièrement le transport en pays de montagne. Tous ces appareils étaient remarquables par leur construction soignée et le bon agencement de leurs organes.

MM. Chaligny et Cie (ancienne maison Calla), de Paris, présentaient une machine mi-fixe et deux locomobiles.

La mi-fixe est à deux cylindres compound, échappement libre, chaudière de locomotive à foyer carré et tubes en laiton. Les locomobiles sont monocylindriques : l'une (A) a une chaudière à foyer amovible avec tubes en fer; la chaudière de l'autre (B) est du type locomotive, à foyer carré et tubes en laiton; les dimensions de ces machines sont portées au tableau ci-après :

	MI-FIXE.	LOCOMOBILE *A*.	LOCOMOBILE *B*.
Puissance au frein	34 chevaux.	12 chevaux.	8 chevaux.
Diamètres des cylindres	190 et 335 millim.	150 millim.	132 millim.
Course des pistons	400 millim.	300 millim.	250 millim.
Nombre de tours par minute	105	120	130
Surface de chauffe	$16^{mq}36$	$8^{mq}60$	$6^{mq}00$

MM. J. Boulet et Cie (ancienne maison Hermann-Lachapelle), de Paris, exposent plusieurs locomobiles et mi-fixes de dispositions et de formes variées. On voit figurer, dans cette exposition, plusieurs spécimens du type vertical *Hermann-Lachapelle,* avec mécanisme indépendant de la chaudière, ainsi que des locomobiles et mi-fixes horizontales; l'une des mi-fixes est à deux cylindres compound.

La maison V. Biétrix et Cie, de Saint-Étienne (Loire), donne plusieurs applications de son distributeur rotatif; elle expose une machine mi-fixe compound à condensation de 45 chevaux et une mi-fixe tandem à échappement libre de 45 chevaux, toutes deux munies de ce système de distribution.

MM. Dandoy-Mailliard, Lucq et Cie, de Maubeuge (Nord), construisent de petites mi-fixes qui sont remarquables, moins par leurs dispositions que par leur mode de fabrication. La figure 140 en représente un spécimen; la production se fait par séries complètes; les pièces sont entièrement ajustées à la fraise, et toutes interchangeables; aussi, malgré leur exécution très parfaite, ces machines sont vendues à bon marché. Il y a là une organisation du travail qu'il était intéressant de signaler et que le jury a hautement appréciée.

Mentionnons encore la mi-fixe de M. Bérendorf fils, de Paris, avec tubes amovibles d'un système bien connu; les belles locomobiles de M. A. Albaret, de Rantigny-Liancourt (Oise), qui a apporté de notables perfectionnements à ce genre de moteurs et aux machines agricoles en général; les locomobiles et mi-fixes de la Société française de matériel agricole et industriel, de Vierzon (Cher), celles de M. Damey, de Dôle (Jura), de MM. Olry, Granddemange et Coulanghon, de Paris, de M. Weidknecht, de Paris, etc. Nous aurions d'autres constructions à citer, également dignes d'intérêt par leurs bonnes dispositions et les soins apportés à leur établissement; mais il est bon de s'arrêter, et nous terminerons l'étude des machines d'origine française par la description de deux appareils qui l'un et l'autre présentent, soit par leurs dispositions, soit par leur objet, des particularités intéressantes.

La première est une mi-fixe compound exposée par la Société alsacienne de constructions mécaniques, qui a ses ateliers à Belfort, Mulhouse et Grafenstaden. Ce moteur,

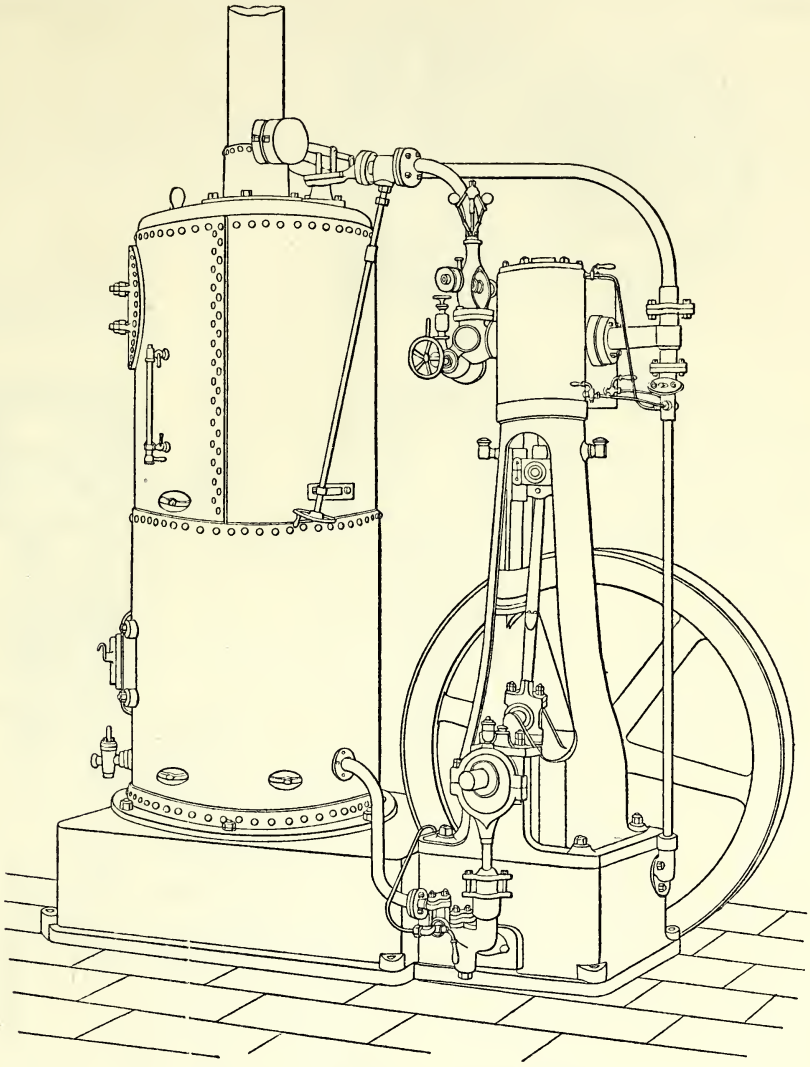


Fig. 140. — Mi-fixe de Dandoy-Mailliard.

représenté par la figure 141, rappelle, par son dessin, certaines mi-fixes anglaises : la machine est disposée au-dessous de la chaudière. Les dimensions principales sont données dans le tableau ci-après :

Diamètres des cylindres	260 et 400 millim.
Course des pistons	500 —
Nombre de tours par minute	135
Nombre de tubes	66
Surface de chauffe totale	$43^{mq}33$
Surface de grille	$1^{mq}00$

La chaudière est du type locomotive, avec foyer carré; elle repose tout entière sur un solide châssis en fonte, qui est le bâti de la machine, et dont elle assure la sta-

IMPRIMERIE NATIONALE.

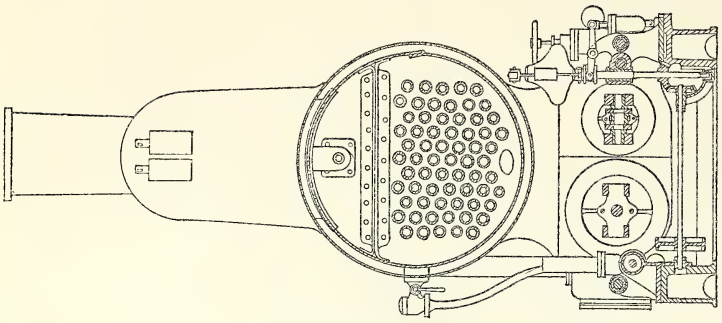
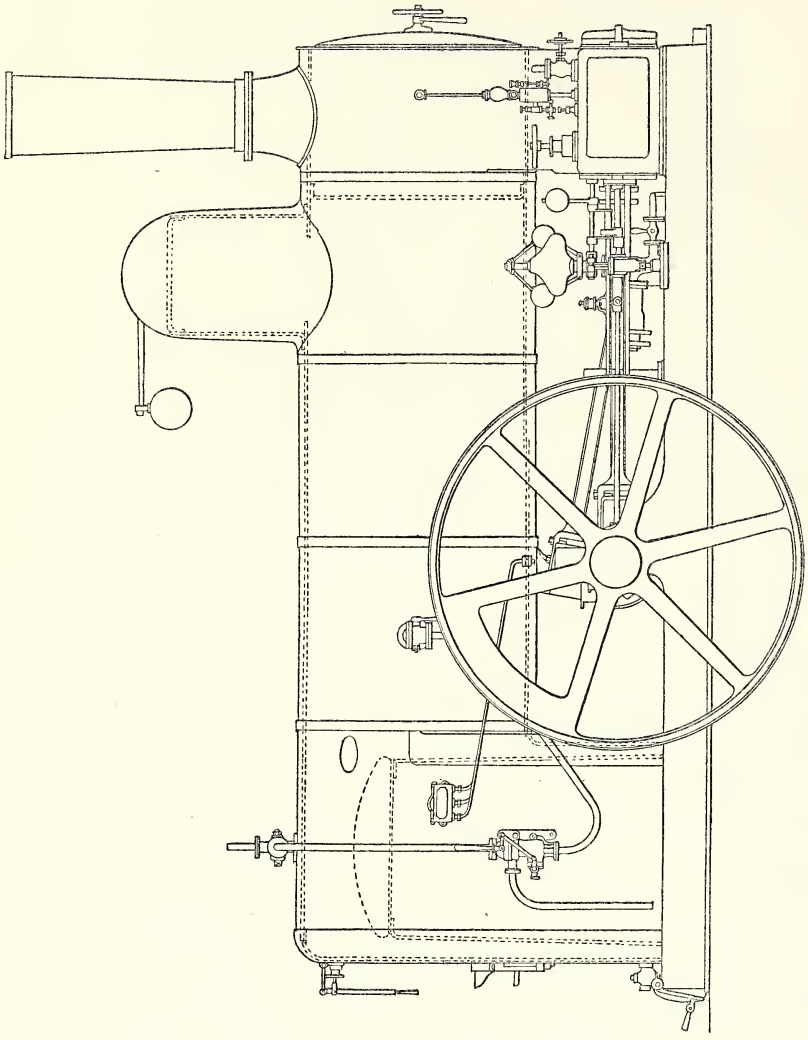
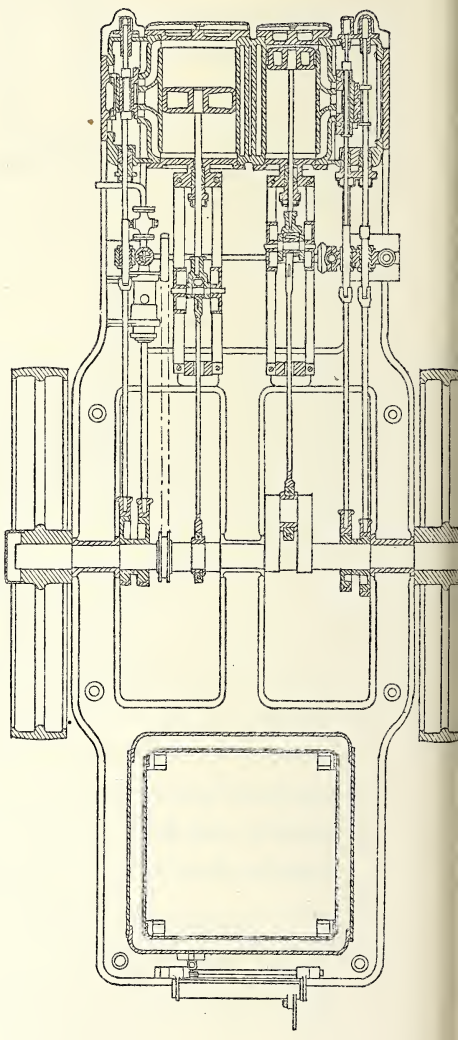


Fig. 141.
Mi-fixe compound
de la Société alsacienne.





bilité par son propre poids. Les deux cylindres sont placés côte à côte, dans une commune enveloppe formant chemise de vapeur. L'arbre moteur est à deux vilebrequins croisés; il est garni de deux volants-poulies en porte à faux. La distribution est

fixe au grand cylindre; au petit cylindre, elle est du système Rider et variable par le régulateur.

La seconde machine est un spécimen fort bien établi de locomotive routière; elle est exposée par MM. L. et A. Pécard frères, de Nevers (Nièvre), et représentée par la

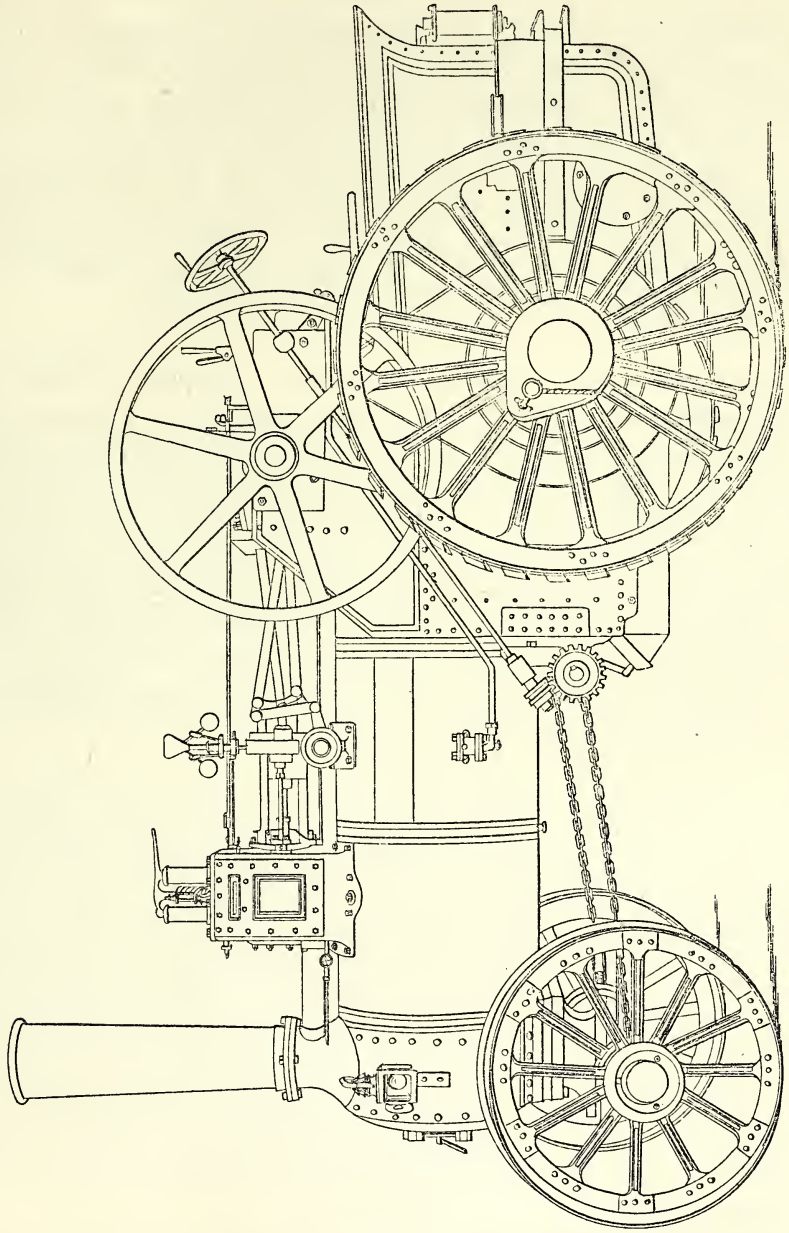


Fig. 142. — Locomotive routière de L. et A. Pécard frères.

figure 142. La chaudière, du type locomotive, est supportée par deux paires de roues; les roues d'arrière sont motrices et reçoivent, par engrenage, leur mouvement de la

machine; elles sont entièrement en acier et munies de larges jantes, armées de barres obliques à la circonférence pour éviter le patinement; les roues d'avant sont porteuses, et leur essieu pivote sur une cheville ouvrière fixée à la chaudière; ce pivotement est obtenu par une double chaîne, manœuvrée par un volant à la main du conducteur. La machine est à deux cylindres conjugués, agissant sur deux manivelles croisées; la distribution est à changement de marche par coulisse de Stephenson; les organes de la machine, comme dans les locomobiles anglaises, sont fixés directement sur le corps de la chaudière, sans l'intermédiaire d'un bâti. L'arbre du volant commande par engrenage les roues motrices, avec embrayage à deux vitesses et débrayage, permettant d'isoler les roues de l'arbre et de faire travailler la machine par une courroie jetée sur le volant; un engrenage différentiel donne la facilité d'imprimer aux deux roues motrices des vitesses inégales, et par conséquent de faire tourner l'appareil dans des courbes très raides; une soute à charbon et une caisse à eau sont logées autour de la plate-forme du mécanicien; celui-ci a sous la main les divers leviers de manœuvre.

En matière de locomobiles et mi-fixes, les sections étrangères n'étaient pas fort riches. La maison Davey, Paxman et Cie, de Colchester (Angleterre), présentait quelques spécimens de sa fabrication. Les Ateliers de construction d'Œrlikon (Suisse) exposaient une locomobile de quelques chevaux. L'exposition la plus importante de cette nature était celle de la Société suisse pour la construction de locomotives et de machines, de Winterthur. C'est un moteur d'environ 35 chevaux, constitué par une chaudière de locomotive, reposant sur une machine compound horizontale, disposition analogue à celle de l'appareil exposé par la Société alsacienne. Les constructeurs ont appliqué ici le système de distribution par tiroirs plats avec lumières circulaires, que nous avons eu précédemment l'occasion de décrire.

Comme suite à l'étude des locomobiles et mi-fixes, il convient de dire quelques mots des machines à vapeur dites *domestiques*. Des tentatives nombreuses ont été faites pour procurer aux ouvriers en chambre la puissance mécanique dont ils ont besoin. Dans les grandes agglomérations, le problème a été résolu à l'aide de canalisations, permettant de répartir par petites fractions l'énergie créée dans une usine centrale; ces sortes de distribution de puissance se sont beaucoup multipliées, et, pour les réaliser, on s'est adressé à des intermédiaires variés; suivant les cas ou les idées des inventeurs, on s'est servi d'engins mécaniques, de fluides chauffés, comprimés ou dilatés, de gaz combustibles, de courants électriques, etc. Plusieurs de ces solutions sont devenues pratiques; mais elles présentent toutes un point commun : à savoir, la liaison avec une canalisation issue d'une usine centrale.

La machine à vapeur échappe à cette obligation, et c'est là ce qui en rendrait intéressante l'application aux usages domestiques; le problème a tenté plus d'un inventeur. Il serait injuste, en parlant de cette question, d'omettre la solution si ingénieuse qui a

été proposée par M. H. Fontaine et si remarquée à l'Exposition de 1878 : une petite machine à vapeur à haute pression, alimentée par une chaudière chauffée au gaz; cet ensemble était agencé d'une façon fort heureuse; des organes d'une grande simplicité assuraient la régularité du fonctionnement. La solution d'ailleurs n'était pas complète, car l'appareil empruntait sa chaleur à une canalisation de gaz.

Dans un ordre d'idées un peu différent et se rapprochant davantage de notre sujet, il convient de mentionner la très jolie machine de Baxter, qui était exposée, en 1878, par la Colt's Fire Arme Manufacturing Company, de Hartford, Conn. (États-Unis). La même maison présentait, en 1889, des types de cette machine. C'est un moteur à haute pression, constitué par une chaudière verticale chauffée au charbon et une petite machine également verticale. Tous les organes sont fort simples, interchangeables, merveilleusement combinés et exécutés. Mais en somme, c'est une machine à vapeur ordinaire, répondant fort bien aux besoins d'une petite industrie, mais non pas à ceux d'un ménage.

Il faut le reconnaître, ce problème si attrayant est hérissé de difficultés. L'appareil doit être simple, facile à manœuvrer et à entretenir; il faut qu'on puisse le mettre entre des mains ignorantes et inexpérimentées; enfin, condition qui prime toutes les autres, il est indispensable qu'il présente une sécurité parfaite, absolue : un outil cesse d'être domestique, s'il peut devenir une cause de danger pour ceux qui s'en servent ou qui l'approchent. Cette dernière condition, la plus impérieuse, est peut-être aussi la plus difficile à remplir.

Comme tout moteur à vapeur, les moteurs domestiques se composent de trois éléments : le foyer, la chaudière et la machine.

La machine n'est que la réduction d'une machine à vapeur ordinaire, avec des organes simplifiés et adaptés à ce service spécial.

Le foyer exige des dispositions particulières; le chargement ne pouvant se faire qu'à intervalles éloignés, deux ou trois fois par jour, il faut que le foyer puisse recevoir une bonne provision de combustible et ne le laisse brûler que petit à petit; il faut également que la combustion se règle sur la consommation de vapeur, de manière que la pression reste à peu près constante.

La chaudière est l'élément véritablement dangereux. Une petite chaudière est, plus encore qu'une grande, délicate à conduire, difficile à entretenir et surtout à nettoyer. Ses organes de garniture, soupapes, manomètres, robinets, sont tout petits; ils s'encrassent, grippent et fonctionnent mal; le tartre, les coups de feu, les excès de pression, sont fort à redouter; le moindre joint qui crève peut occasionner un accident.

Beaucoup d'inventeurs se sont attaqués à ce problème difficile. Si les solutions ne sont pas toutes satisfaisantes, on rencontre néanmoins dans ces recherches des idées intéressantes.

Le moteur étudié par MM. Friedrich et Jaffé est construit à Paris par MM. Panhard et Levassor, pour des puissances de 1 à 15 chevaux. Le foyer est à grande capacité, avec grille très inclinée et chargement par une trémie; un registre admet, au besoin, de l'air froid en quantité variable, de manière à rafraîchir le foyer; ce registre est manœuvré par un appareil automatique, sous la dépendance de la pression qui règne dans la chaudière. Le générateur est en fonte et composé d'un coffre, avec deux fonds plats horizontaux entretoisés par des boulons; le fond inférieur porte une série de tubes pendentifs, analogues aux tubes Field, et qui constituent la partie active de la chauffe; le fond supérieur est mobile et peut être déplacé en grand pour les visites et le nettoyage; il suffit pour cela de dévisser les boulons-entretoises et de défaire un grand joint boulonné, qui fait le tour du couvercle. La machine, à double effet, est suivie d'un condenseur par surface; les eaux de condensation, purifiées des matières grasses par décantation, sont reprises à l'aide d'une pompe et renvoyées à la chaudière.

M. Albaret, de Rantigny-Liancourt (Oise), expose un moteur fort intéressant (fig. 143), étudié par MM. Hathorn, Davey et Cie. Le caractère distinctif de ce moteur, c'est qu'il fonctionne uniquement par le vide; il ne présente donc aucun danger d'explosion. La construction est d'ailleurs fort simple. Le foyer en fonte est formé d'une grille *A* et d'une boîte *BB*, laquelle est traversée par un bouilleur *CC* et aboutit dans le haut à la cheminée *D*. Il est coiffé par un coffre en fonte *EEEE*, qui l'enveloppe de toute part et constitue la chaudière; dans le dôme de celle-ci est installé le cylindre *FF*; l'échappement, qui se fait par le tuyau *aa*, envoie la vapeur au condenseur par surface *GG*, qui, renfermé dans une caisse à eau, se démonte facilement. L'eau de condensation et l'air se rassemblant dans le collecteur inférieur *b*, sont puisés par la pompe à air *H*; l'eau retourne dans la bâche *K*; celle-ci, par un jeu de flotteur, est mise, en temps utile, en relation avec la chaudière, dans laquelle l'eau s'écoule librement, puisqu'il n'y a pas de pression. Cette chaudière est munie d'une soupape de sûreté, simple plaque guidée et non chargée, par laquelle la vapeur s'écoule dans la cheminée, dès que la pression dépasse celle de l'atmosphère. Le cylindre est en bronze, ainsi que sa boîte à tiroir.

Pour un moteur d'un cheval, les dimensions sont :

Diamètre du cylindre	170 millim.
Course du piston	130 —
Nombre de tours par minute	120
Surface de grille	$0^{mq}07$
Surface de chauffe (jusqu'au niveau de l'eau)	$1^{mq}45$
Poids	900 kilogr.

Ce moteur consomme, par heure, 5 à 6 kilogrammes de coke, 30 à 40 kilogrammes d'eau d'alimentation et 600 à 700 litres d'eau de condensation. La même eau peut d'ailleurs être employée plusieurs fois après refroidissement.

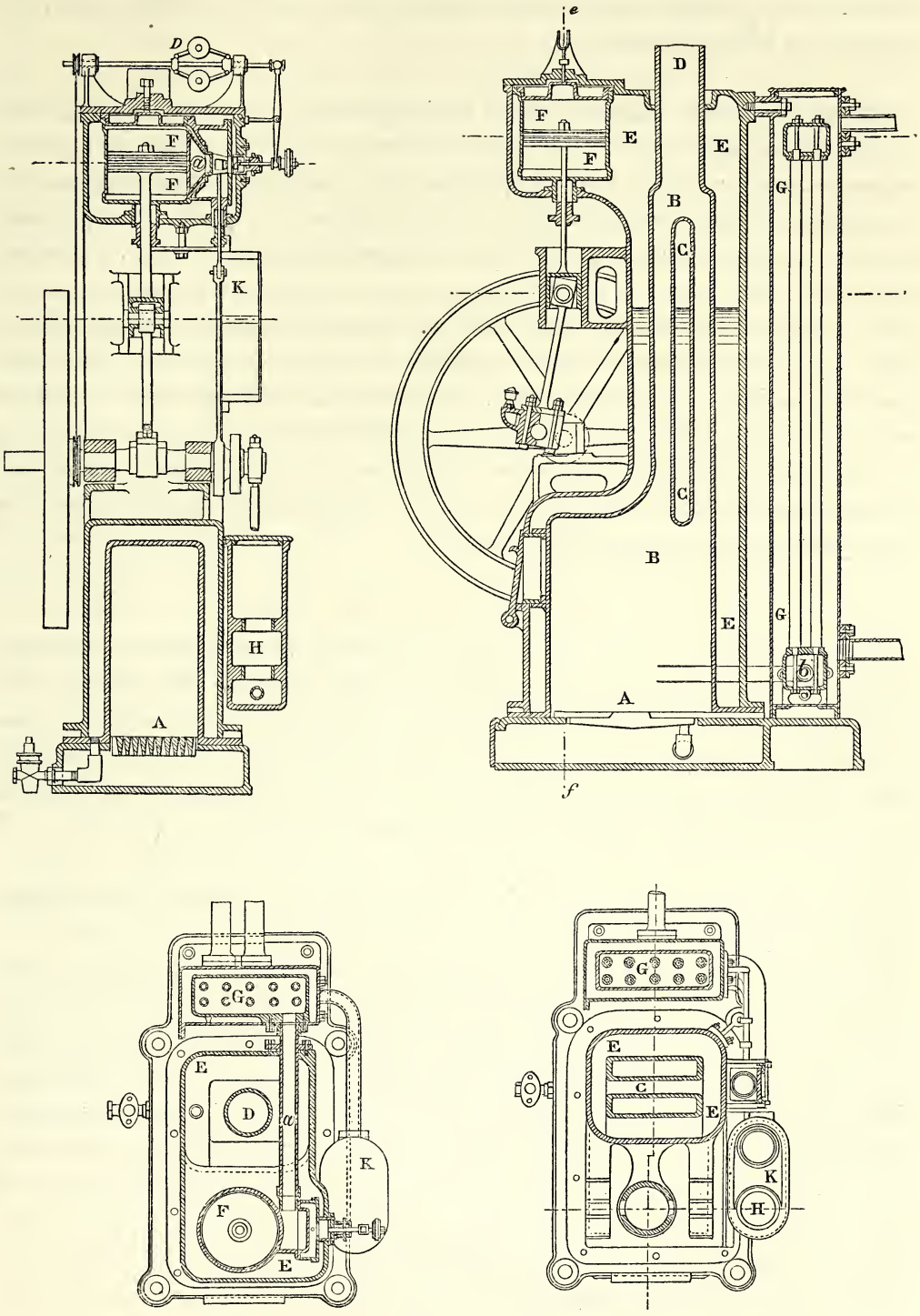


Fig. 143. — Moteur domestique de Hathorn, Davey et Cie, construit par Albaret.

Quelques perfectionnements récents ont été apportés à cet appareil; le foyer en fonte notamment a été remplacé par un foyer en tôle d'acier, muni de quelques tubes pour augmenter la surface de chauffe.

Comme exemples de chaudières tout à fait inexplosibles, il convient de rappeler les générateurs Serpollet et la très intéressante exposition de la Société des générateurs à vaporisation instantanée, de Paris. Nous avons donné précédemment la description de ces appareils; l'élément vaporisateur est un tube en acier ou en cuivre, aplati, enroulé en spirale, et plongé dans les gaz du foyer. La capacité intérieure du tube est extrêmement petite; l'eau, qui y est injectée par une pompe foulante, est instantanément réduite en vapeur, en chassant devant elle, sous forme de poussière impalpable, les dépôts qui ont pu se former. Tous les appareils de sûreté usités dont sont munies les chaudières ordinaires sont ici supprimés. Rien de simple, de sûr et de facile à conduire comme un pareil générateur; en combinant convenablement les dispositions du foyer et en associant à la chaudière une petite machine, on constitue un moteur domestique, qui semble posséder toutes les qualités requises. Les spécimens exposés étaient fort remarquables et ont vivement attiré l'attention.

Toutes les machines à vapeur que nous avons décrites jusqu'à présent sont composées des mêmes organes essentiels, à savoir : un piston à double effet, circulant dans un cylindre, un arbre de couche animé d'un mouvement de rotation continue, et une transmission mécanique entre le piston et l'arbre. Nous allons maintenant aborder l'étude de quelques types exceptionnels, dans lesquels l'un ou l'autre de ces éléments sont modifiés dans leurs fonctions ou même totalement supprimés.

Nous commencerons par les machines dans lesquelles la pression s'exerce sur une seule face du piston.

Les machines à simple effet sont loin d'être une nouveauté. Les premiers moteurs à vapeur, ceux construits par Newcomen, fonctionnaient de cette façon, et le même système a été longtemps et demeure encore, dans certains cas, le seul employé pour l'épuisement des mines et l'élévation des eaux. Mais c'est dans un ordre d'idées tout différent que le simple effet est appliqué de nos jours. Il ne s'agit plus de machines à allure très lente, traînant des masses énormes, susceptibles de faire volant malgré leur faible vitesse. Tout au contraire, le but poursuivi est d'obtenir des rotations rapides à l'aide d'organes aussi légers que possible. A cet effet, on dispose les choses de telle sorte, que les pièces de la transmission travaillent toujours de la même manière, par exemple, uniquement à la compression; et, pour obtenir ce résultat, on fait agir la pression sur une seule face du piston; on supprime ainsi les chocs dangereux qui tendent à se produire en fin de course, au moment où le sens de la pression se renverse.

C'est à M. Peter Brotherhood, de Londres, que l'on doit la vulgarisation de ce principe. Il l'a appliqué dans un type de machine, constitué par trois cylindres à simple effet, convergeant vers un même arbre et attaquant le vilebrequin unique venu sur cet arbre. Cette machine a été étudiée dans les rapports sur l'Exposition de 1878; elle est d'ailleurs trop connue pour qu'il soit utile de revenir sur sa description. Disons seulement que son succès a été énorme, qu'elle a été reproduite à des milliers d'exemplaires, pour mettre en mouvement toute sorte d'outils à rotation rapide, dynamos, pompes centrifuges, scies circulaires, ventilateurs, etc., et qu'on l'actionne tantôt par la vapeur, tantôt par l'air comprimé, tantôt par l'eau sous pression.

Parmi les nombreux problèmes que soulève le fonctionnement des machines à allure rapide, il en est un fort important, c'est celui des effets de l'inertie sur les organes animés de grandes vitesses. Ces effets sont extrêmement intenses; aux vitesses couramment pratiquées de 500 à 600 tours par minute, les forces d'inertie atteignent des centaines de fois le poids des pièces en mouvement. Les contrepoids que l'on applique sur les volants neutralisent ces effets, mais d'une façon fort imparfaite, attendu que s'ils peuvent être établis de manière à équilibrer complètement les masses tournantes, ils ne sauraient en même temps contre-balancer les forces d'inertie du piston et de son attirail.

Le problème est susceptible d'une solution théorique à peu près parfaite : imaginons deux pistons égaux et se mouvant dans un même cylindre; ces deux pistons agissent, par des bielles égales, sur les deux vilebrequins, égaux et opposés, d'un même arbre. Il est clair que, dans ces conditions, et à part les légères inégalités provenant de l'obliquité des bielles, les forces d'inertie de tous les organes se neutralisent complètement autour de l'arbre tournant. Il est non moins évident qu'une pareille machine ne peut être matériellement réalisée, dans les termes rigoureux ci-dessus définis.

Divers inventeurs, en adoptant le principe, se sont efforcés de tourner les difficultés d'application. Il existait, il y a plus de trente ans, dans les ateliers des chemins de fer autrichiens, à Vienne, une machine établie sur les données qui précèdent par M. Haswell, ingénieur du matériel. Les deux pistons se mouvaient dans un long cylindre, dont chacun d'eux parcourait la moitié; la tige du piston arrière traversait celui d'avant, et pénétrait dans sa tige creuse et fendue latéralement. Les deux bielles, très voisines, attaquaient deux vilebrequins, placés très près et de part et d'autre du plan moyen de l'appareil. La machine, qui tournait fort vite, était suspendue à la charpente en bois de l'atelier, et fonctionnait sans bruit et sans produire le moindre ébranlement dans cette charpente assez légère.

La machine inventée par M. Burgin (Émile), et exposée par la Société de constructions mécaniques, de Bâle (Suisse), repose sur les mêmes principes, mais les procédés d'application sont un peu différents. Cette machine (fig. 144) a la forme pilon; le cylindre, très long, est parcouru par deux pistons à simple effet, l'action de la vapeur s'exerçant

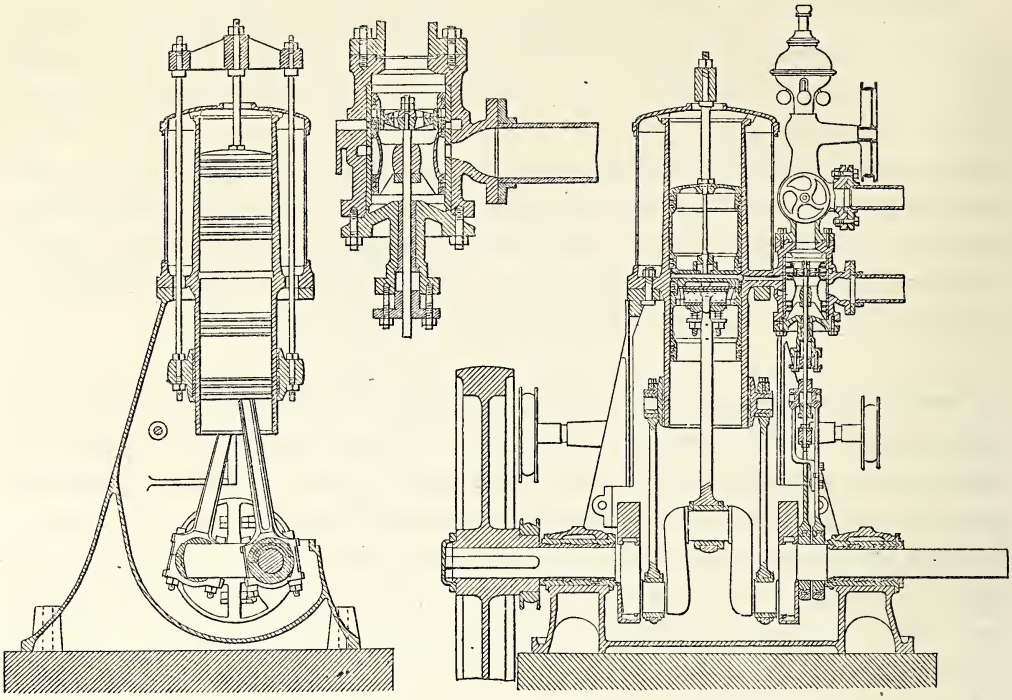


Fig. 144. — Machine du système Burgin, construite par la Société de Bâle.

entre ces pistons. Le piston inférieur attaque directement, par une bielle sans tige, un vilebrequin de l'arbre de couche. Le piston supérieur agit sur deux vilebrequins égaux, opposés au premier et symétriquement placés par rapport à lui; cette transmission est constituée comme il suit : la tige du piston est munie d'un T avec tiges pendantes, qui actionnent un anneau entourant le cylindre, lequel est ajusté extérieurement et sert de glissière; sur cet anneau sont venus deux tetons, sur lesquels s'articulent les deux bielles attaquant l'arbre du volant. Il suffit d'une répartition judicieuse des masses pour assurer la neutralisation permanente des forces d'inertie. On remarquera les attaches élastiques des petites têtes de bielle. Les pistons sont très longs, de manière à éviter le contact de la vapeur avec les parties des parois du cylindre qui ont été précédemment refroidies par l'air extérieur. La distribution à simple effet, du genre Meyer, est donnée par deux tiroirs-pistons, jouant l'un dans l'autre et commandés par deux excentriques; la tige du tiroir de détente joue à l'intérieur de la tige creuse du tiroir de distribution.

M. F. Weidknecht, constructeur à Paris, expose une machine compound à grande vitesse, d'un système assez original, imaginé par M. Ch. Brown (fig. 145). Cette machine, disposée en pilon, comporte deux pistons à simple effet. Le piston de haute pression *A* agit directement sur l'arbre du volant par une bielle sans tige. Le piston de basse pression *BB* est annulaire; il attaque, par des bielles sans tige, deux manivelles symétriques opposées à la première; il glisse entre les parois du cylindre extérieur et celles

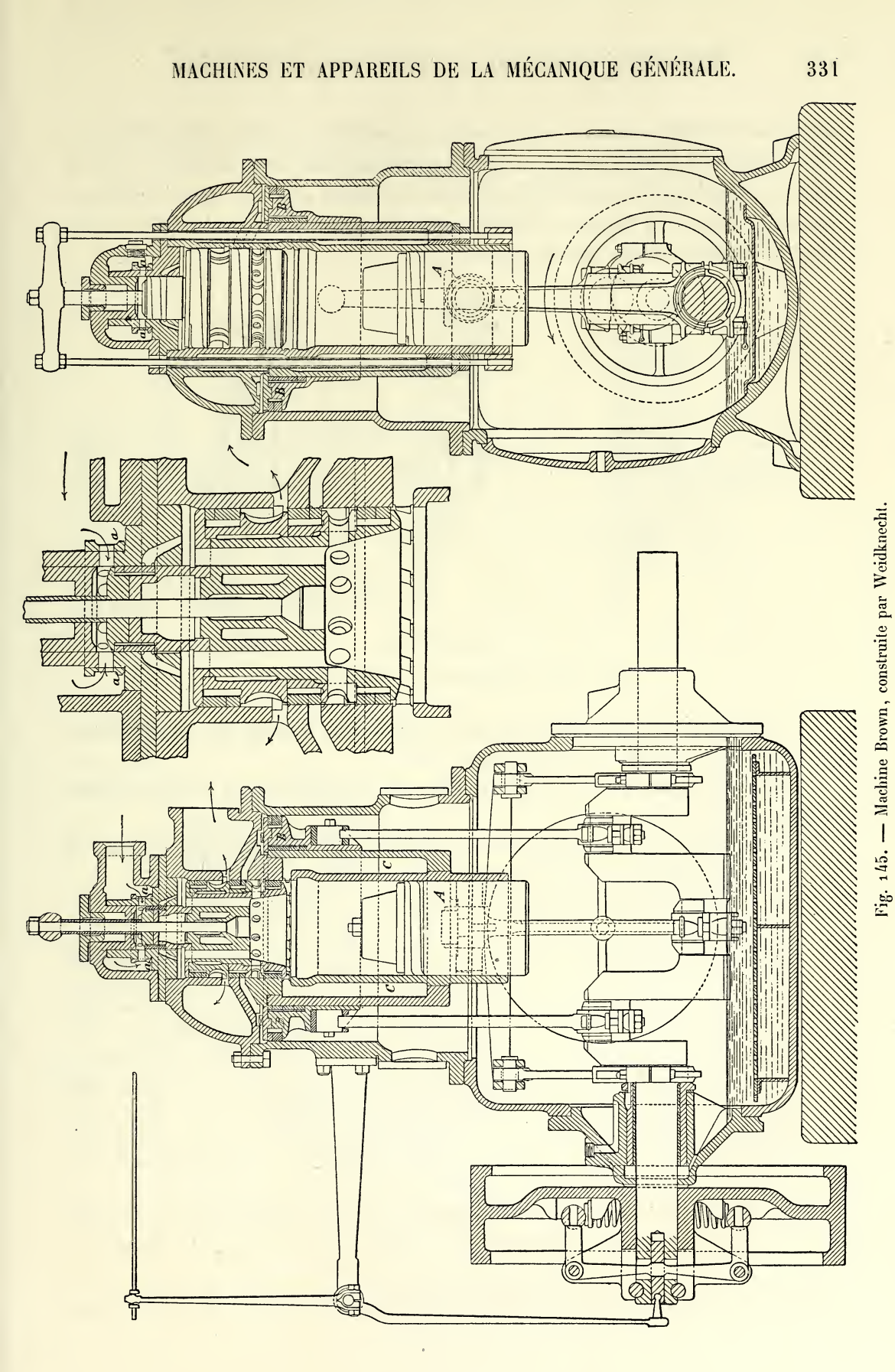


Fig. 145. — Machine Brown, construite par Weidknecht.

du receiver *CC*. L'équilibration des masses en mouvement est ainsi réalisée d'une manière complète. Le tiroir est cylindrique et placé dans l'axe de la machine; les fonctions du tiroir sont clairement indiquées par les figures 146 *abc*, dans lesquelles 1 représente l'arrivée de vapeur, 2 l'échappement, 3 la lumière du grand cylindre annulaire, 4 la communication avec le receiver.

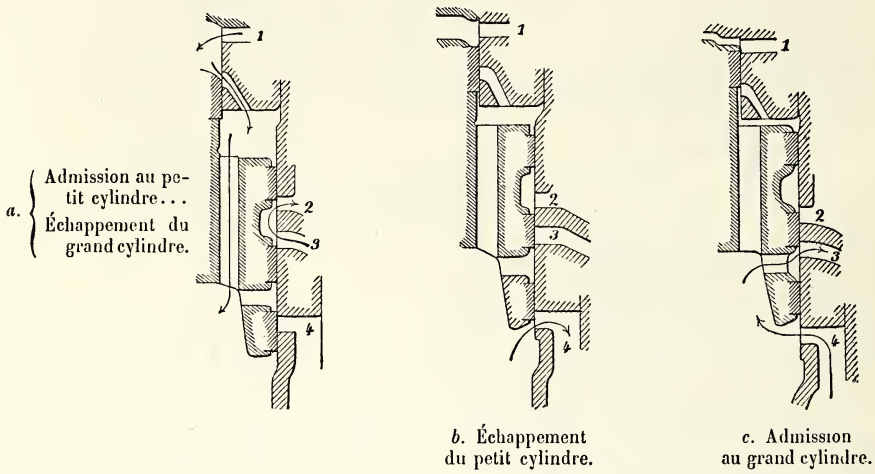


Fig. 146. — Distribution de la machine Brown.

Le tiroir est mis en mouvement par deux excentriques, agissant par l'intermédiaire d'une transmission facile à lire sur la figure 145.

Le régulateur, placé dans le volant, agit sur une couronne *aa*, qui étrangle l'arrivée de vapeur.

Tout le mécanisme est renfermé dans une boîte en fonte, dont le bas renferme de l'huile dans laquelle barbotent les organes.

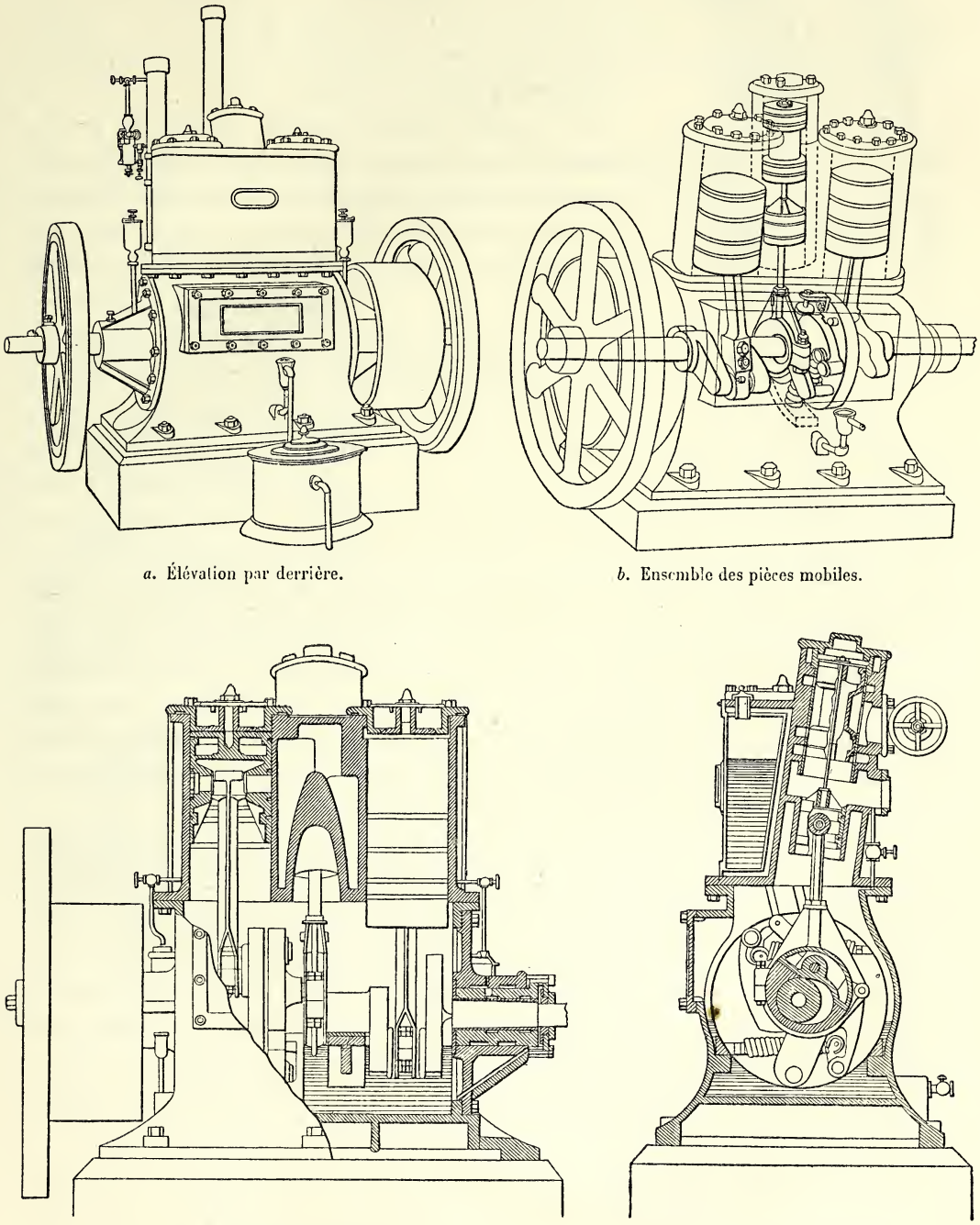
Les dimensions principales de cette machine sont :

Diamètre du petit piston	250 millim.
Soit une section de	490 cmq.
Diamètres du grand piston	410 millim. 600
Soit une section de	1,507 cmq.
Course des pistons	250 millim.
Nombre de tours par minute	400
Puissance, environ	50 chev.
Encombrement	1^m00 sur 2^m00

M. Weidknecht présente en outre le dessin d'une machine à double effet, de 100 chevaux et de dispositions tout à fait analogues à celles que nous venons de décrire.

En partant des données que nous avont rappelées précédemment, M. Westinghouse,

le célèbre inventeur de l'un des freins de chemins de fer les plus répandus, a étudié, en vue de l'éclairage électrique, un type spécial de machine à grande vitesse, très compact et très peu encombrant. Plusieurs spécimens, exposés par la Westinghouse Machine



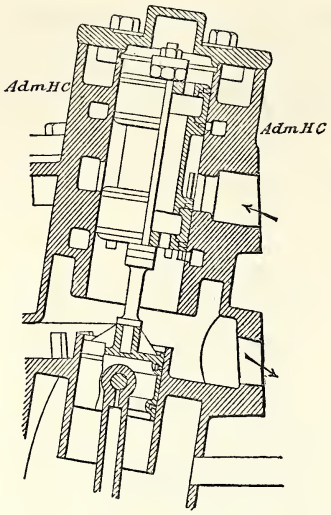
a. Élévation par derrière.

b. Ensemble des pièces mobiles.

c. Coupe longitudinale.

d. Coupe transversale.

Fig. 147. — Machine Westinghouse.



e. Détail du tiroir.

Fig. 147 *bis*.
Machine Westinghouse.

Company, de Pittsburgh (États-Unis), figuraient à l'Exposition, notamment une machine de 25 chevaux, qui fournissait l'électricité au pont roulant de MM. Bon et Lustremant. La même maison a fourni un grand nombre de machines, tant en Amérique qu'en Europe, et les fabrique par séries; d'un type à l'autre, les dispositions ne varient que par les détails.

La machine Westinghouse est représentée par les figures 147*a* à 147 *e*; la figure 147*b*, extraite du catalogue de la maison, fait saisir très nettement l'agencement du mécanisme. Deux pistons à simple effet, disposés en pilon, agissent sur un arbre à deux vilebrequins opposés, de sorte que l'ensemble représente une machine à double effet; entre les deux cylindres, et dans une position légèrement inclinée, est placée la distribution; celle-ci est opérée par un tiroir formé de deux pistons solidaires, dont chacun est affecté à la distribution dans l'un des cylindres. L'échappement se produit par la partie inférieure; pour l'un des cylindres, il est direct; pour l'autre, la vapeur détendue traverse le tiroir par un canal pratiqué dans sa longueur (fig. 147 *c*, 147 *d*, 147 *e*). Le tiroir est actionné par un excentrique à coulisse, dont le déplacement est gouverné par un régulateur monté sur l'arbre. Les pistons sont assez longs pour qu'aucun des points de la paroi intérieure des cylindres qui sont en communication avec la vapeur ne vienne au contact de l'atmosphère; ils portent les articulations des bielles, qui sont longues relativement à la course. Le bâti forme une cuve fermée et pleine d'huile, dans laquelle barbotent les organes du mouvement; cette huile, chauffée par la vapeur d'échappement, est renouvelée lentement, après avoir été clarifiée par décantation.

Telle qu'elle est constituée, cette machine se recommande, dans beaucoup d'applications, par des avantages précieux. Elle est fort légère, elle tient très peu de place; son prix d'achat n'est pas élevé eu égard à la puissance développée; elle peut s'atteler sans transmission intermédiaire sur une dynamo; ses fondations sont peu importantes; la marche est tranquille; enfin l'entretien est facile et peu coûteux : à cet égard, la suppression des presse-étoupe, des godets graisseurs et l'interchangeabilité des pièces offrent de sérieux avantages; enfin toute la construction est fort soignée.

A titre d'exemple, nous donnons ci-après les dimensions de deux machines, extraites de la série :

Puissance effective moyenne	15 chev^x.	150 chev^x.
Diamètres des cylindres	162 millim.	387 millim.
Course des pistons	150 —	350 —
Nombre de tours par minute	400	280

Emplacement occupé....	Longueur	1m,25	2m,90
	Largeur	0m,75	1m,95
	Hauteur	1m,05	2m,15
Poids		815 kilogr.	5,889 kilogr.
Prix à Paris		2,800 fr.	17,500 fr.

M. Westinghouse présente également des machines compound d'un type analogue au précédent, et sur lesquelles il est inutile d'insister.

En avançant dans cette étude, nous rencontrons des moteurs à vapeur dont les dispositions s'éloignent de plus en plus de celles généralement usitées.

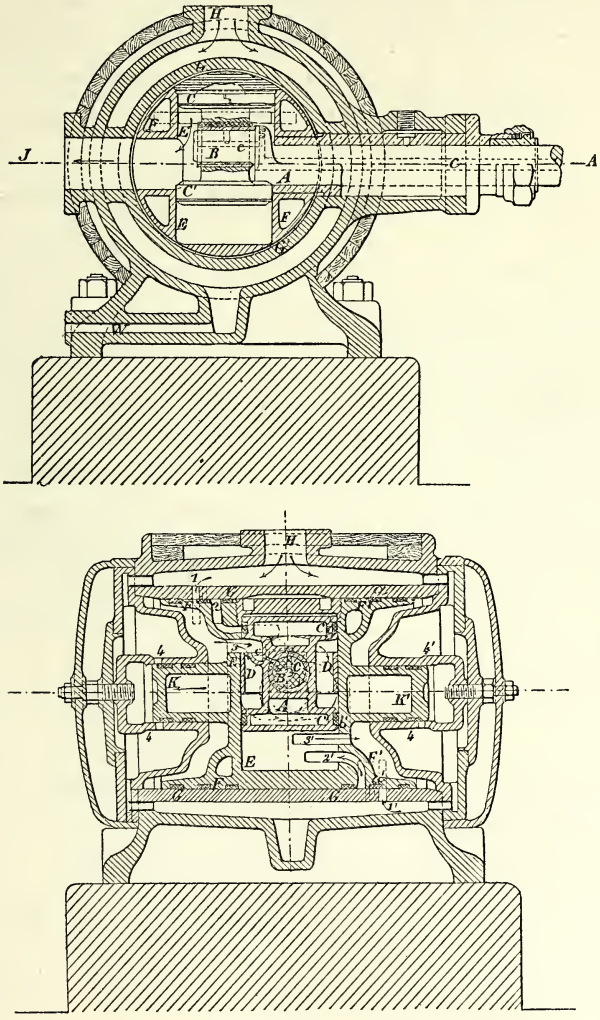


Fig. 148. — Machine Woolf, système Bonjour.

Le moteur que nous allons décrire comporte encore des cylindres, avec leurs pistons, ainsi qu'un arbre à manivelle; mais tout le mécanisme de la transmission est ramené à l'état rudimentaire; presse-étoupe, tiges de piston, crosses, bielles, tout cela a disparu; il en est de même des organes de distribution.

Cette machine singulière et originale est exposée par la Compagnie des fonderies et forges de l'Horme, chantiers de la Buire (Rhône), et construite sur les dessins de M. Cl. Bonjour, qui a fourni à l'Exposition de 1889 un contingent si remarquable d'inventions. Elle est représentée par la figure 148. C'est une machine Woolf; le petit cylindre est solidaire du grand piston et lui est perpendiculaire; le petit piston est articulé directement sur la manivelle, et forme glissière à l'intérieur du grand piston, qui l'entraîne dans ses excursions; ces deux mouvements rectangulaires, en se combinant, déterminent la rotation de l'arbre.

Sur la figure 148, *AA* est l'arbre de couche, *B* la manivelle; celle-ci tourne à

l'intérieur du petit piston, qui est composé de deux plateaux *C* et *C'*, avec garnitures au pourtour, et d'une fraction d'anneau *DD* formant guidage contre les parois du cylindre; ce cylindre *EE* est venu dans le grand piston, qui est lui-même composé de deux plateaux *FF* et *F'F'*, et se meut dans le cylindre fixe *GGG*. Il résulte de ces dispositions que le grand piston est aux extrémités de sa course lorsque le petit est au milieu de la sienne, et réciproquement.

Chacun des pistons sert de distributeur à l'autre. Étudions cette distribution; elle est curieuse. La vapeur est introduite par la tubulure *H*; elle se répand dans l'enveloppe qui entoure de toutes parts le grand cylindre. Les lumières 1 et 1' la font pénétrer dans le petit cylindre, lorsque les lumières d'admission 2 et 2' viennent en correspondance avec elles; 3 et 3' sont les lumières du grand cylindre, et servent successivement à établir la communication de ce dernier, soit avec le petit cylindre soit avec l'échappement; quant à celui-ci, il a lieu par la capacité comprise entre les deux plateaux constituant le petit piston, laquelle est en relation permanente avec la tubulure d'échappement *J*.

Les garnitures *aa'* du grand piston et *bb'* du petit piston jouent le rôle de distributeurs, à la façon des barrettes d'un tiroir.

La machine tournant à très grande vitesse, il est nécessaire que la compression soit considérable. A cet effet, les lumières de communication 3, 3' ont été pratiquées assez loin des fonds du petit cylindre, de telle sorte que le petit piston, vers la fin de sa course, emprisonne derrière lui un volume important de vapeur, qui se comprime et forme matelas. Ce procédé n'était pas applicable dans le grand cylindre; l'auteur a eu recours à un autre artifice : le grand piston porte deux amortisseurs *KK'*, véritables dash-pot; la vapeur s'introduit, par les lumières 4 4 et 4'4', en arrière de ces amortisseurs et s'y comprime lorsque ces lumières se ferment par le déplacement même de l'appareil : c'est un ressort absolument parfait, qui n'entre en jeu qu'à fin de course.

Le graissage intérieur est fait par un canal *cc*, creusé dans l'axe de l'arbre; l'huile se répand dans tous les frottements par l'effet de la force centrifuge.

Cette ingénieuse machine tourne à une vitesse qui atteint 1,800 révolutions par minute.

M. Bonjour a étudié diverses variantes de ce moteur; dans un de ces modèles, la distribution, donnée par un excentrique, est variable à la main.

Comme système bizarre et original de moteur à vapeur, on rencontrait celui imaginé par M. Gérard de Montrichard. Mais ce moteur ne peut guère s'appliquer qu'à la commande d'une pompe; c'est pourquoi nous en renvoyons la description au chapitre relatif aux machines hydrauliques.

Nous arrivons aux machines dites *rotatives* : ici, il n'y a plus ni cylindre ni transmission; le piston consiste en un diaphragme, fixé sur l'arbre et qui tourne avec lui.

La simplicité du système est fort séduisante; aussi des multitudes d'inventeurs se sont-ils exercés sur ce problème attrayant. Le grand Watt, tout le premier, prit patente pour une machine rotative, et il n'est pas d'année où les listes des brevets ne contiennent beaucoup d'inventions de ce genre. Le succès, jusqu'ici, est loin d'avoir couronné ces efforts. Il est vrai que le but poursuivi n'est pas toujours bien nettement aperçu : nombre d'inventeurs se proposent d'améliorer l'effet utile de la vapeur, par la suppression des frottements auxquels donnent lieu les transmissions généralement usitées; il y a là une erreur manifeste; dans une machine ordinaire convenablement construite et graissée, les frottements absorbent au plus 20 p. 100 de la puissance indiquée et souvent beaucoup moins; il y a peu à gagner sur ce chiffre, et, en tout cas, il ne paraît guère qu'au point de vue des résistances passives, le système rotatif puisse donner de meilleurs résultats.

La question se pose autrement dans certains cas; l'économie de vapeur étant mise à part, il arrive que, pour certaines opérations, on est amené à rechercher un moteur extrêmement léger et de volume très réduit; c'est ce qui se présente notamment pour les perforatrices employées dans les mines; dans de telles circonstances, le système rotatif peut présenter un véritable intérêt.

C'est ainsi que l'a compris M. Taverdon, de Paris. M. Taverdon s'est fait une spécialité de la construction des outils destinés à l'exploitation des mines. En 1878, il exposait une perforatrice, dont l'organe essentiel était une machine rotative, mue par l'air comprimé, et dont la conception était fort ingénieuse. A l'Exposition de 1889, il présente plusieurs moteurs rotatifs, aussi remarquables par leurs dispositions que par l'originalité des procédés d'exécution. Nous donnons ci-après (fig. 149 et 150) les dessins de deux de ces moteurs.

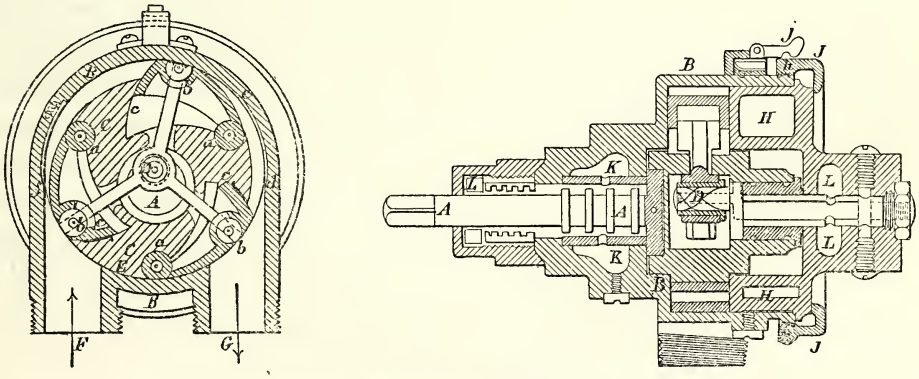


Fig. 149. — Machine Taverdon à trois palettes.

Le premier (fig. 149) est dit *à trois palettes*. L'arbre tournant *AA* est excentré par rapport au cylindre *BB*; sur cet arbre est fixé un disque *CC*, lequel porte, au moyen des

IMPRIMERIE NATIONALE.

articulations *aaa*, les trois palettes *ab*; les sommets *b* de ces palettes sont maintenus en contact avec la paroi cylindrique par trois biellettes, articulées sur la cheville fixe *D*, concentrique au cylindre. On voit que, suivant leur position, ces palettes sont plus ou moins en saillie sur le disque; les appendices *bc* pénètrent dans des échancrures correspondantes. En *E* le contour du disque affleure la paroi cylindrique. Le fluide moteur entre par *F* et s'échappe par *G*.

Le moteur représenté sur cette figure peut marcher à la vapeur, à l'air comprimé ou à l'eau sous pression. Pour permettre l'emploi de l'eau, on l'a disposé de telle sorte que la marche ait lieu sans détente; à cet effet, la paroi cylindrique est creusée de deux lumières *de* et *fg*, les points *e* et *g* étant à une distance égale à la distance des sommets de deux palettes consécutives, de manière que, pour l'intervalle entre deux palettes, l'échappement commence à une extrémité à l'instant où l'admission cesse à l'autre; mais en agrandissant l'intervalle *eg*, on peut utiliser la détente de l'air ou de la vapeur.

Les articulations *a* et les contacts *b* et *c* sont rendus étanches à l'aide de garnitures constituées par de petites lames de ressort. Pour faire le joint sur les faces planes du tambour, l'auteur a recours à un artifice ingénieux : le couvercle *HH* de ce tambour peut être rapproché du fond par un mouvement micrométrique. A cet effet, la couronne *JJ*, formant appui sur ce couvercle, engrène en *hh* sur un filet de vis très fin; on tourne cette couronne jusqu'à ce qu'il y ait contact sans pression entre les organes intérieurs, puis on la fixe en place au moyen du rochet *j*, engrenant sur des crans pratiqués sur le pourtour de la couronne. Des réservoirs de graisse *KK* et *LL* assurent la lubrification des organes.

La figure 150 représente un autre moteur, fondé sur les mêmes principes, mais muni d'un distributeur spécial, permettant de faire varier la détente. Il ne comporte que deux vannes; l'admission de vapeur se fait par l'arbre creux *A*, percé de deux lumières *a* et *b*; cet arbre est actionné, à l'aide de deux roues dentées égales, par l'arbre du moteur, et tourne avec la même vitesse angulaire; on voit tout de suite que la durée de l'admission dépendra de la largeur de la lumière *c*, par laquelle la vapeur doit passer pour arriver au canal *B* et entrer dans le cylindre. Or cette lumière est pratiquée à travers la paroi d'un manchon cylindrique, qui peut être déplacé en tournant sur son axe; ce manchon est percé d'une série de lumières *c*, *d*, *e*, *f*, de largeurs progressives, et qui peuvent être successivement amenées vis-à-vis du canal B; plus est large la lu-

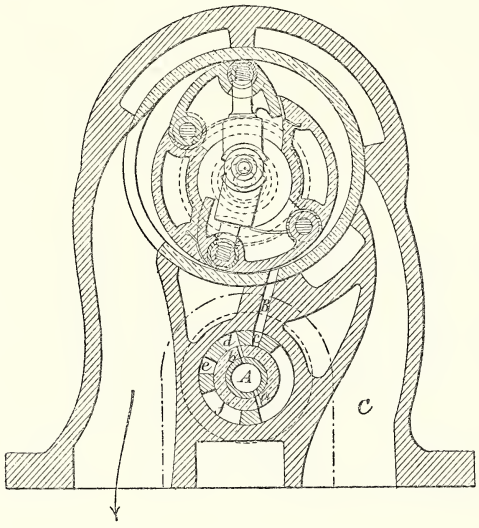


Fig. 150. — Machine Taverdon à deux palettes.

mière mise en prise, plus l'admission est prolongée; ce déplacement du manchon se fait à la main.

Le même moteur peut être actionné par l'eau comprimée, qui est amenée par la conduite *C*; il suffit, pour cette application, de faire à l'appareil quelques retouches, dont on peut sans peine se rendre compte. Les moteurs rotatifs de M. Taverdon atteignent sans difficulté des vitesses de 1,000 tours à la minute.

Les autres moteurs rotatifs figurant à l'Exposition ne présentent pas un intérêt aussi grand, et paraissent encore assez éloignés de l'application pratique. Citons la machine de M. Bornet, de Paris; le moteur du système *West,* exposé par la Colt's Fire arme Manuf. Company, de Hartford (Connecticut), et qui consiste en un disque décrivant autour de son centre un mouvement conique, et sur le contour duquel s'appuient six petits pistons, agissant successivement. Mentionnons encore les moteurs de MM. Nègre et Cie, de Paris, et Thomas-Jésupret, de Paris, qui rappellent par plus d'un point la machine rotative patentée par James Watt : un tore est parcouru par un piston, rattaché à un axe tournant par une tige; celle-ci passe à travers une fente, pratiquée suivant le cercle équatorial intérieur du tore; une cloison diamétrale sépare le fluide sous pression, qui agit en arrière du piston, de la capacité à basse pression communiquant avec l'échappement; divers artifices sont employés pour que cette cloison s'efface au passage du piston, pour fermer la fente équatoriale, etc. Il est inutile d'insister, ces machines étant présentées comme des projets plutôt que comme des outils industriels.

Il n'en est pas ainsi des turbines à vapeur, que nous allons maintenant décrire. La turbine Parsons, une des merveilles de l'Exposition de 1889, malgré son invention toute récente, a déjà reçu des applications étendues; et il semble peu douteux qu'elle ne tardera guère à prendre une certaine place parmi les moteurs employés par l'industrie. Nous croyons nécessaire d'étudier avec quelques détails ce moteur intéressant.

Dans ces appareils, le fluide n'agit plus, comme dans les machines ordinaires, par sa pression statique, mais bien en vertu de la vitesse qu'il prend à sa sortie d'un orifice; cette action dynamique est tout à fait analogue à celle qui s'exerce dans les turbines hydrauliques; de là le nom donné au nouveau moteur : on l'appelle *turbine à vapeur, turbo-moteur;* lorsqu'il est attelé sur une dynamo, l'ensemble prend la dénomination de *générateur turbo-électrique.*

Le turbo-moteur, avons-nous dit, se rapproche par certains points de la turbine hydraulique; mais, d'autre part, la nature même du fluide mis en jeu amène des différences profondes dans la constitution des deux appareils. Dans toute machine à action dynamique, il existe certaines proportions nécessaires entre les vitesses du fluide agissant et celles des organes récepteurs; il faut que ces vitesses soient de grandeurs comparables. Avec l'eau, la chose est facile : la densité de l'eau est assez forte, et les vitesses qu'elle prend sous les charges en usage sont parfaitement comparables à celles que l'on

peut imprimer aux organes de machines. Il n'en est pas de même pour la vapeur d'eau : en sortant d'un orifice pratiqué sur la paroi d'une chaudière, ce fluide est animé de vitesses telles, qu'aucune pièce métallique ne pourrait s'y accommoder. Il a fallu tourner la difficulté. L'inventeur y est parvenu par un artifice aussi simple qu'ingénieux.

Dans le turbo-moteur, l'écoulement se produit entre deux récipients, dont les pressions sont peu différentes, et, par conséquent, sous une vitesse modérée; le travail correspondant à cette vitesse est recueilli par une turbine. Une série de turbines analogues sont étagées à la suite l'une de l'autre, chacune d'elles recevant le fluide du récipient d'amont pour le transmettre, après travail et dépression, au récipient d'aval : c'est ainsi que, d'étage en étage, la pression va en décroissant progressivement, depuis la chaudière jusqu'à l'échappement, tandis que la vapeur cède à chacun des récepteurs qu'elle rencontre sur son trajet une partie de l'énergie qu'elle renferme; ces moteurs, travaillant sous des charges modérées, peuvent recevoir des vitesses acceptables.

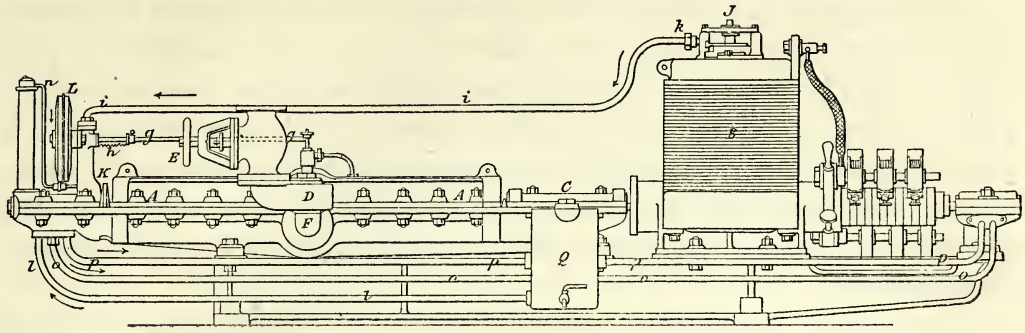
L'idée de faire agir la vapeur en mouvement sur un récepteur analogue à une turbine n'est pas absolument nouvelle. Des indications dans ce sens ont été données par Burdin, l'un des créateurs des turbines hydrauliques. Il existe au Conservatoire des arts et métiers un petit modèle de turbine à vapeur, construit par M. Gauckler, inspecteur général des ponts et chaussées. Tournaire, inspecteur général des mines, avait, dès 1877, établi, avec une grande netteté la théorie de turbines à vapeur multiples, tout à fait semblables, comme constitution, aux turbo-moteurs Parsons. Sous une forme un peu différente, Girard, l'illustre hydraulicien, a émis de son côté des idées analogues et fait même quelques essais, qui d'ailleurs n'ont pas eu de suite.

Mais il y a loin des idées théoriques à la réalisation pratique, et ces précédents n'enlèvent rien au mérite du créateur des turbo-moteurs.

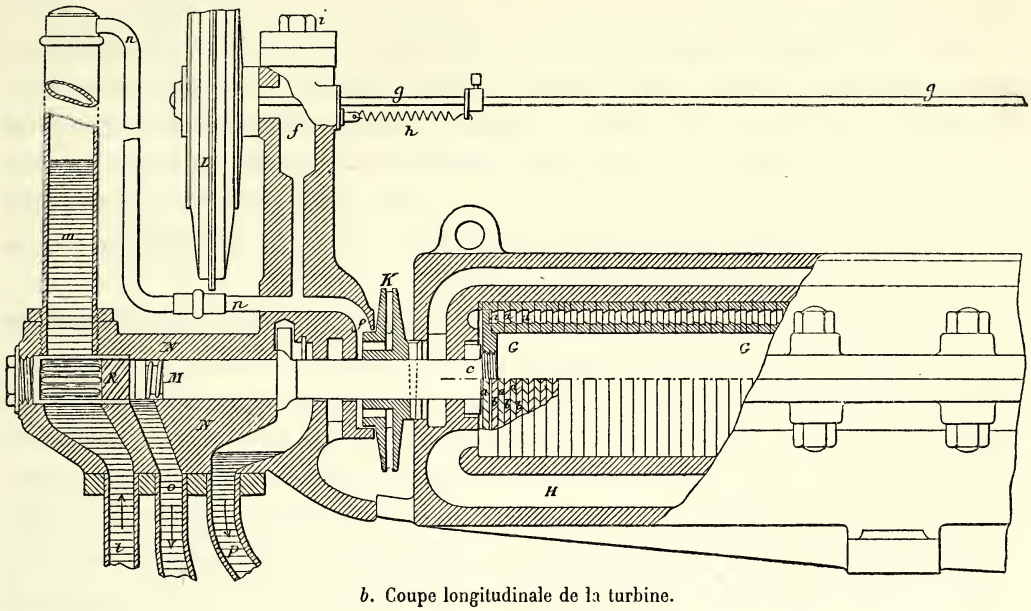
La turbine à vapeur imaginée par M. Parsons fut présentée pour la première fois au public en 1885, à l'occasion de l'Exposition des inventions à Londres. Elle fut alors considérée comme une curiosité scientifique. Mais elle ne tarda pas à recevoir des perfectionnements importants, grâce au concours actif de l'inventeur et des constructeurs MM. Clarke, Chapman et Cie. A l'Exposition de Newcastle, l'éclairage était fourni par quatorze turbo-générateurs d'électricité, donnant ensemble une puissance de près de 500 chevaux. A l'Exposition de 1889, les turbo-générateurs étaient présentés par MM. Weyher et Richemond (*Société centrale de construction de machines*, à Pantin), concessionnaires en France du brevet pour les applications ordinaires, et par MM. Sautter et Lemonnier, de Paris, concessionnaires pour la Guerre et la Marine.

Dans la description qui va suivre, nous ne séparerons pas la machine motrice de la dynamo qu'elle commande; ces deux éléments sont intimement liés l'un à l'autre.

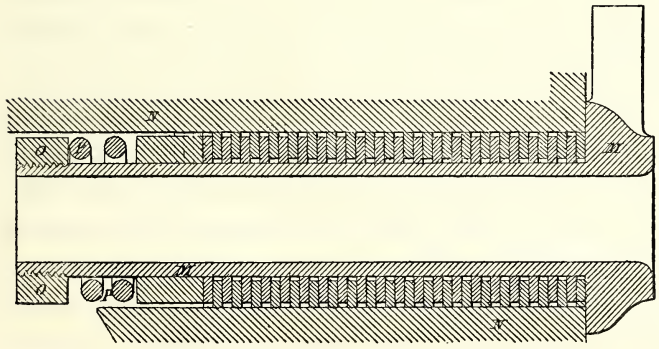
Les figures 151 *a*, *b*, *c*, *d* représentent un générateur turbo-électrique simple, donnant 200 ampères sous une tension de 80 volts, soit une puissance électrique d'environ 25 chevaux de 75 kilogrammètres. Les figures 152 *a*, *b*, *c* sont les dessins d'un générateur à triple expansion, de 400 ampères sous 80 volts, soit environ 50 chevaux.



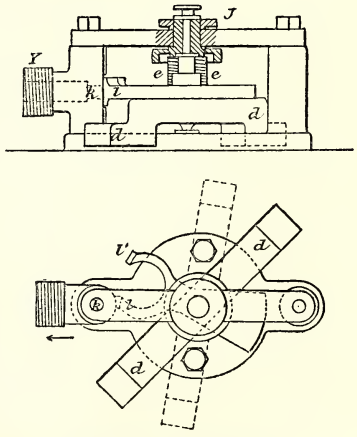
a. Élévation.



b. Coupe longitudinale de la turbine.



c. Coupe du palier.



d. Régulateur magnétique.

Fig. 151. — Générateur turbo-électrique Parsons (200 ampères à 80 volts, 25 chevaux).

Dans la figure 151 *a*, le moteur est représenté en *AA*; la dynamo *B* est reliée au moteur par une simple douille à deux trous carrés, placée en *C*; la vapeur est introduite en *D* par la valve d'arrêt *E*; les turbines, montées sur un axe commun, sont réparties en deux séries égales de 30 turbines chacune, symétriques par rapport à la prise de vapeur centrale, de manière que les pressions s'équilibrent de part et d'autre de cette prise. La vapeur, après avoir agi sur les turbines et être arrivée aux deux extrémités de l'appareil, est ramenée par une double conduite à la tubulure centrale d'échappement *F*.

Chaque turbine *aaa* (fig. 151 *b*) est précédée de son distributeur *bb*. Une turbine est constituée par un disque en bronze, taillé sur son pourtour en forme d'aubes obliques. Tous ces disques sont enfilés sur un axe *GG*, dont ils sont rendus solidaires par un clavetage, et fortement serrés par la vis *c*. Les distributeurs *bb* sont des anneaux en bronze, portant à l'intérieur des directrices obliques, taillées en sens inverse des aubes des turbines, sur lesquelles elles dirigent les jets de vapeur. L'obliquité des aubes et des directrices va en diminuant du centre aux extrémités de l'appareil, au fur et à mesure que la pression de la vapeur décroît. Les distributeurs sont serrés dans une coquille en deux pièces, formant enveloppe du moteur : *H* est la conduite de retour qui ramène la vapeur détendue à la tubulure d'échappement.

Pour régulariser l'allure de la machine, M. Parsons a recours à un dispositif des plus ingénieux et d'une efficacité merveilleuse. La puissance absorbée par la dynamo pouvant varier entre des limites fort éloignées, et brusquement avec le nombre des lampes en service, il importe que le système régulateur soit à la fois très puissant et très sensible. A cet effet, le canal d'amenée de vapeur *D* (fig. 151 *a*) est occupé par une valve-papillon, qui l'étrangle plus ou moins, et la position de ce papillon est en relation avec l'intensité du champ magnétique des électros *B*; ces électros sont montés en dérivation sur le circuit extérieur. Sur leur culasse est installé le régulateur magnétique *J*, représenté à plus grande échelle par la figure 151 *d*. Il se compose d'un barreau en fer doux *dd*, monté délicatement sur pointes, et qui est soumis à l'action magnétique des électros; cette action est contre-balancée par un ressort en hélice *e*. L'attraction magnétique est trop faible pour agir directement sur le papillon; cette action est transmise par l'intermédiaire d'un véritable servo-moteur, qui emprunte sa puissance à la machine motrice elle-même. Sur l'arbre tournant est montée une petite roue de ventilateur *K* (fig. 151 *a* et *b*), laquelle tend, par l'intermédiaire de la conduite *ff*, à faire le vide dans le soufflet en cuir *L*. Ce soufflet agit, par la transmission *gg*, sur la valve-papillon; le ressort *h* se prête à l'ouverture de la valve et à l'écartement des fonds du soufflet; le vide qui règne en *ff* tend à produire un effet contraire; donc à chaque degré du vide correspond une ouverture déterminée du papillon. C'est ce degré de vide qui est commandé par le régulateur magnétique. A cet effet, le soufflet *L* est relié au régulateur *J* par un tuyau *ii*, qui se termine en *k* (fig. 151 *d*) par un trou; quand celui-ci est ouvert, l'air aspiré par le ventilateur passe librement et sans dépression; si ce

trou vient à être obturé, le vide se produit, et d'autant plus intense que l'obturation est plus complète. Cette fermeture est faite par une palette *l*, qui affleure l'orifice et qui tourne avec le barreau *dd*. Grâce à cette transmission, on voit que tout déplacement du barreau *dd*, c'est-à-dire toute modification dans le magnétisme des électros, est immédiatement accompagné d'un déplacement correspondant de la valve-papillon; et comme pour passer de l'une à l'autre de ses positions extrêmes, donnant l'ouverture ou la fermeture complète de l'orifice *K*, il suffit que le barreau tourne d'un angle très faible, il en résulte que la régulation se produit avec une extrême délicatesse. En fait, on peut, à volonté, éteindre ou rallumer presque toutes les lampes alimentées par le générateur, sans que les autres lampes subissent dans leur éclat des variations sensibles.

Comme moyen de réglage, on dispose du ressort *h*, dont on peut faire varier la tension en déplaçant le curseur sur lequel il prend appui; on peut aussi faire varier l'angle que fait la palette *l* avec le barreau *dd*. On remarquera sur la figure 151 *d* une seconde palette *l'*, qui est destinée à empêcher la machine de s'emballer si l'aimantation des électros vient à manquer, en se plaçant spontanément devant l'orifice *k*.

Avec les grandes vitesses de rotation que prend le turbo-moteur, il importe que l'équilibrage et le centrage des masses en mouvement soient parfaits et que les frottements soient extrêmement doux.

L'équilibrage de l'axe portant les turbines est assuré par son mode même de construction; le centrage est obtenu par un dispositif spécial des coussinets représenté par la figure 151 *c*. Le coussinet en bronze *MM* est entouré d'une série de rondelles en acier, qui s'ajustent exactement sur lui et qui sont intercalées entre des rondelles un peu plus grandes, s'ajustant exactement dans la cage fixe *NN*; le tout est fortement serré par l'écrou *OO*, par l'intermédiaire du ressort *PP*. Les deux jeux de rondelles pouvant glisser légèrement l'un sur l'autre, le coussinet se place spontanément dans la position axiale.

Le graissage se fait par circulation continue; l'huile est contenue en approvisionnement dans le réservoir *Q* (fig. 151 *a*); elle est appelée (fig. 151 *a* et 151 *b*), à travers la conduite *ll*, jusque dans la colonne *m* par l'aspiration produite par le ventilateur *K*. Cette aspiration est transmise de la conduite *ff* par le tuyau *nn*; le pas de vis *R*, pratiqué sur l'arbre tournant, agit comme une pompe et refoule cette huile dans tous les organes frottants; celle-ci vient baigner le coussinet *M*; d'autre part, elle est distribuée par la conduite *oo* aux différents frottements de l'appareil; enfin elle est ramenée au réservoir *Q* par les conduites de retour *pp*.

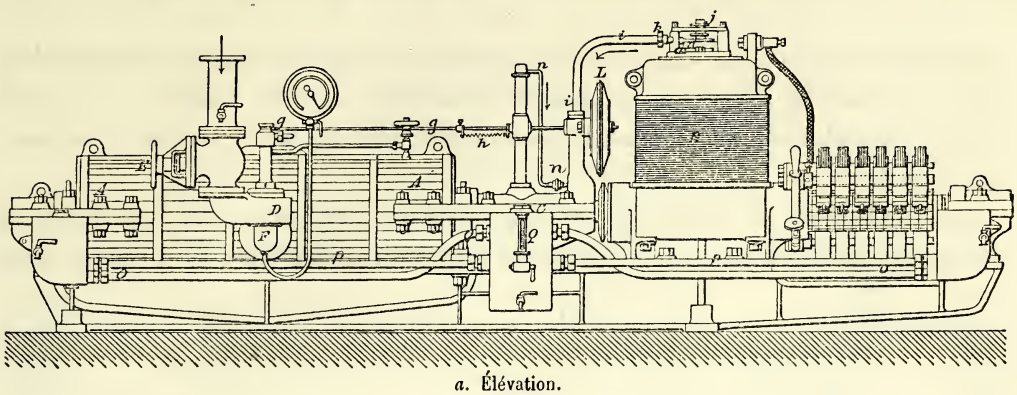
Ainsi qu'on l'a vu plus haut, l'obliquité des aubes et des directrices va en diminuant du centre aux extrémités de la turbine, de telle sorte que les sections offertes à l'écoulement du fluide aillent en croissant progressivement en même temps que son volume spécifique. Néanmoins, la détente est loin d'être complète, et la pression à l'échappement est encore notable.

Afin d'utiliser le mieux possible l'énergie de la vapeur, M. Parsons a eu l'idée de disposer, à la suite du premier barillet, d'autres barillets de plus grand diamètre, dans lesquels l'expansion de la vapeur puisse être prolongée. Les figures 152 *a*, *b*, *c* représentent ce dispositif; la vapeur, après avoir agi sur les turbines *S* (fig. 152 *b* et 152 *c*), est envoyée successivement dans les séries de turbines *T* et *U*, de diamètre progressivement croissant, pour se rendre enfin à l'échappement *F*, lequel peut se faire dans un condenseur. Pour assurer la neutralisation exacte des poussées longitudinales, on a réuni par paires les séries symétriques au moyen des conduites *VV*. Nous ne reprendrons pas la description détaillée de ce nouveau dispositif, lequel, à l'aide des explications précédemment données, se lit facilement sur les dessins. Pour plus de clarté, les mêmes lettres ont été affectées aux mêmes organes sur les figures 151 et 152.

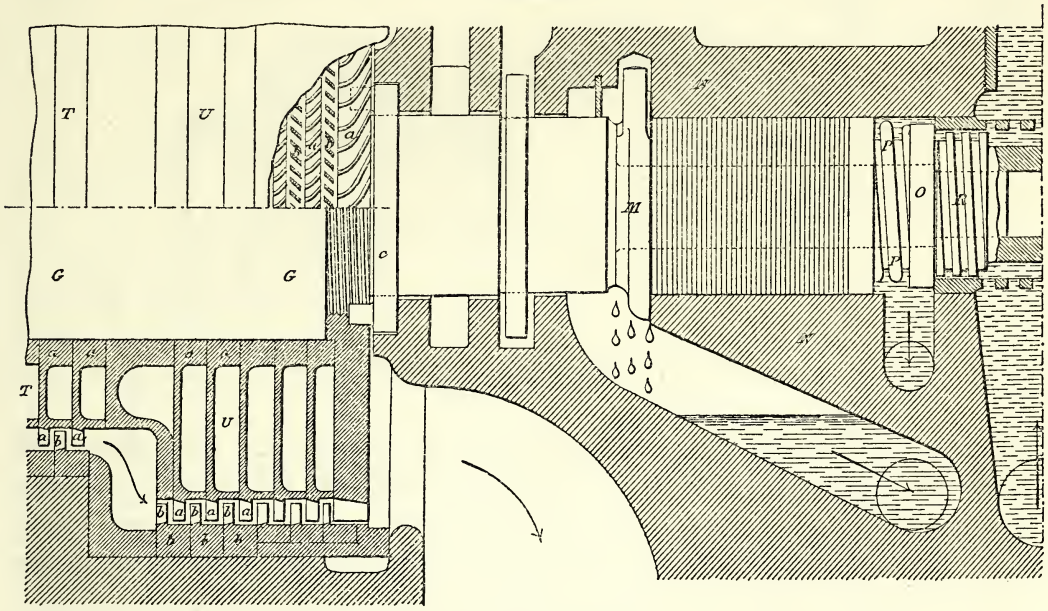
Le premier turbo-moteur construit par M. Parsons en 1885 tournait à 18,000 tours par minute; le second, placé sur le *Earl Percy,* de la Compagnie de navigation de la Tyne, tourne à 10,000 tours. C'est à peu près l'allure du moteur exposé par MM. Weyher et Richemond. Il alimentait 120 lampes à incandescence. C'était merveille de voir avec quelle sûreté et quelle docilité ce générateur faisait son service; il tournait sans bruit et sans mouvement sensible, malgré sa vitesse vertigineuse; pour l'arrêter ou le faire partir, il suffisait d'ouvrir ou de fermer la prise de vapeur; on pouvait à volonté mettre dans le circuit ou hors du circuit un nombre quelconque de lampes, sans faire varier sensiblement l'éclat des autres lampes branchées sur le même conducteur.

Des renseignements fournis, il semble résulter que l'usure de ces machines est faible et leur entretien peu coûteux; quant à la consommation de vapeur, elle serait comparable, à égalité de puissance, à celle des machines à vapeur ordinaires, travaillant dans les mêmes conditions de pression. Quoique plus de 2,000 chevaux électriques aient déjà été fournis sous forme de turbo-moteurs, il n'en est pas moins vrai que cet admirable outil n'en est, pour ainsi dire, qu'à ses débuts; mais ceux-ci semblent pleins de promesses.

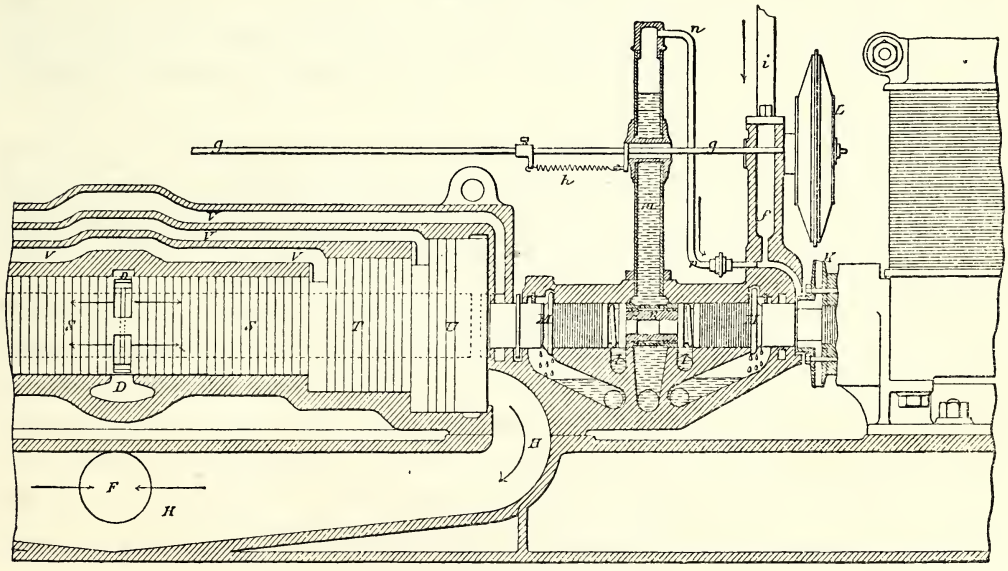
Le servo-moteur, inventé par M. Joseph Farcot en 1868, a donné lieu à des applications de plus en plus nombreuses. On connaît le principe de cet ingénieux appareil. Étant donnée une force d'une grande intensité, telle que la résultante des pressions d'un fluide sur un piston, force susceptible de surmonter des résistances considérables, il s'agit de la maîtriser, de l'asservir, de telle sorte que son point d'application suive fidèlement et docilement tous les mouvements qu'exécute la main du conducteur, que ces mouvements soient lents ou rapides, restreints ou étendus; il faut que le point d'application se déplace ou s'arrête en même temps que la main, et dans la position qui lui a été désignée. Pour obtenir ce résultat, M. Farcot soumet l'organe de distribution à deux actions opposées : celle de la main du conducteur et celle du piston; quand l'appareil est immobile, les deux lumières se trouvent fermées; le conducteur, en déplaçant la rêne de l'appareil, déplace en même temps le tiroir, et le piston se met en



a. Élévation.



b. Détail de la turbine.



c. Section longitudinale de la turbine.

Fig. 152. — Générateur Parsons avec turbine à triple expansion (400 ampères à 80 volts, 50 chevaux).

mouvement dans le sens indiqué. Ce mouvement, en agissant sur une transmission, tend à ramener le tiroir à la position de fermeture; et cette position est atteinte lorsque le piston a décrit une fraction de sa course correspondant à l'espace parcouru par la rêne.

Les applications de ce principe revêtent les formes les plus variées; l'une d'elles est représentée par la figure 153, laquelle est purement schématique. Le piston *A* com-

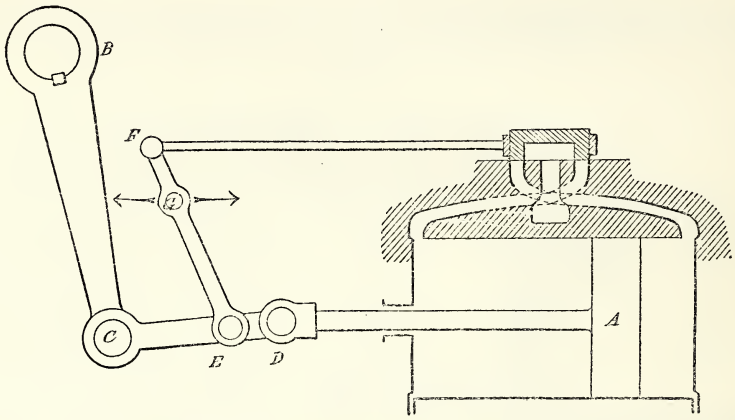


Fig. 153. — Servo-moteur Farcot (schématique).

mande la manivelle *BC*, dont il s'agit d'asservir les mouvements; à cet effet, sur la bielle *CD* s'articule le levier *EF*, dont l'extrémité supérieure attaque le tiroir; celui-ci donne la distribution à l'aide de deux lumières croisées; en *G* s'applique, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un levier (ou rêne), la main du conducteur qui pousse le point *G* à droite ou à gauche. Le jeu de l'appareil se comprend d'ailleurs à l'inspection de la figure. On voit que la résistance que doit surmonter la main du conducteur résulte simplement des frottements du tiroir, qui sont d'ailleurs très faibles si le tiroir est équilibré, tandis que la force de l'appareil a pour facteurs la pression du fluide et l'aire du piston; elle peut être énorme.

Les fluides élastiques, air comprimé ou vapeur, se prêtent moins bien que les liquides à l'asservissement précis et rigoureux; en vertu de la détente, le piston peut dépasser la position correspondant à la fermeture des lumières; il se produit ainsi des flottements, que l'emploi de l'eau sous pression évite complètement.

La figure 154 représente l'adaptation du servo-moteur à la commande par le régulateur de la détente variable, dans les machines compound et à triple expansion exposées par la maison Farcot. L'excentrique *A* agit sur une barre *AB*, sur laquelle est articulée en *C* la bielle du tiroir; l'extrémité *B* parcourt une coulisse *DD*, susceptible de pivoter autour de son centre *E*; la détente varie avec l'obliquité de la coulisse; c'est sur cette obliquité qu'il faut faire agir le régulateur. Mais les résistances à surmonter étant importantes, c'est par l'intermédiaire d'un servo-moteur que se fait la transmis-

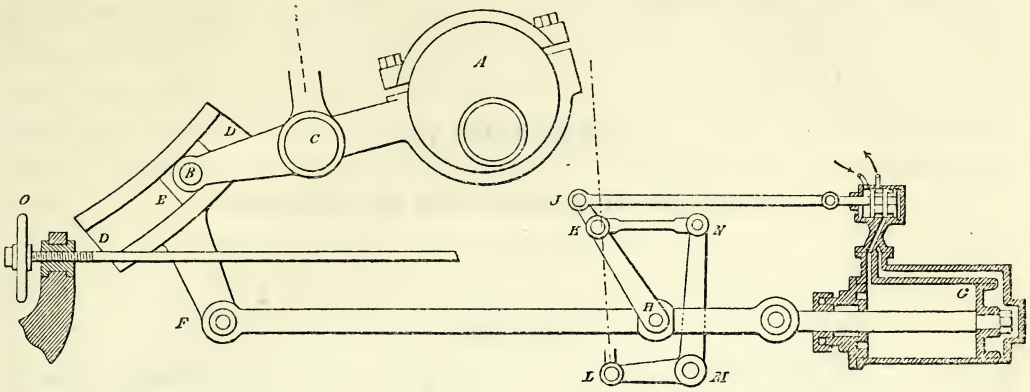


Fig. 154. — Servo-moteur appliqué à une distribution.

sion. A cet effet, la queue *EF* de la coulisse est commandée par le piston *G*, dont le mouvement est asservi par le levier *HJ*; le point *K* de ce levier est attaqué, comme une rêne, par le régulateur, qui agit sur l'articulation *L*; les déplacements du point *L* sont transmis en *K* par le levier coudé *LMN*, tournant autour du point fixe *M*, et par la bielle *NK*. Pour rendre très libre le régulateur, on a donné au tiroir la forme d'un piston équilibré. L'appareil est actionné par les eaux tièdes et sous pression provenant de la condensation dans les enveloppes des cylindres. Pour la mise en train, on se sert du volant à main *O*, qui a pour effet de soulever le régulateur.

La plupart des applications du servo-moteur se trouvent dans les services de la Marine; sur les grands navires de guerre ou de commerce, on s'en sert pour manœuvrer le gouvernail et la mise en marche des machines; et cette manœuvre peut se faire à l'aide de quelques manettes installées dans la cabine de service. Le commandant tient ainsi dans sa main la vitesse et la direction de ces immenses machines navales. On se sert aussi du servo-moteur pour gouverner les plus puissants appareils de levage, les grandes machines d'extraction des mines, pour la manœuvre du changement de marche dans les locomotives, etc.

Toutes ces applications sont en dehors du ressort de la mécanique générale; c'est pourquoi nous ne saurions nous y arrêter. Mais, sans sortir du domaine de la classe 52, nous avons à signaler quelques cas où le principe du servo-moteur a reçu d'heureux emplois. Ainsi, dans la grande machine à vapeur exposée par M. Windsor, de Rouen, la transmission de mouvement entre le régulateur et la détente variable est obtenue à l'aide d'un servo-moteur. De même c'est à un servo-moteur magnétique que le générateur turbo-électrique de M. Parsons doit la merveilleuse stabilité de son allure.

SECTION IV.

RÉGULATEURS ET MODÉRATEURS DE MOUVEMENT.

SOMMAIRE.

Généralités. — Division. — Dispositions des régulateurs. — Détente variable. — Valve-papillon. — Régularisation des machines compound. — Transmission. — Frein liquide. — Transmission à double embrayage. — Transmission par servo-moteur. — Commande du régulateur. — Le volant.

Descriptions. — Régulateur de Farcot. — Compensateur de Denis. — Régulateurs de Biétrix, de Buss, de Pickering, de Taverdon. — Régulateurs dans le volant de Lecouteux et Garnier, d'Escher Wyss, de la machine Straight Line, d'Armington et Sims, d'Œrlikon, de Westinghouse.

Un des problèmes les plus délicats que présente la mécanique appliquée, c'est celui qui a pour but d'assurer aux machines motrices une marche régulière et uniforme. Ce problème a fait l'objet de nombreuses et intéressantes recherches. Dans ces dernières années, des travaux importants ont été publiés sur ce sujet difficile; mais, il faut bien en convenir, l'expérience pratique a contribué, plus que la théorie, à faire avancer la question.

D'autre part, aussi longtemps que les besoins de l'industrie n'exigeaient qu'une uniformité grossière, les solutions approximatives sont restées suffisantes : on se contentait, le plus souvent, de l'ancien dispositif de Watt, ou de tout autre analogue, en faisant empiriquement les retouches nécessaires pour obtenir le résultat voulu. Le procédé est encore acceptable dans bien des cas de la pratique : qu'il s'agisse de conduire un atelier d'ajustage, des pompes, des appareils de levage, etc., quelques écarts de vitesse, entre des limites raisonnables, ne présentent aucun inconvénient sérieux.

Mais il en est tout autrement lorsque le moteur doit commander l'un de ces outils délicats, aujourd'hui si répandus, et qui ne marchent bien qu'à une allure déterminée; par exemple, ce n'est pas impunément qu'on ferait subir des variations de vitesse un peu grandes à une machine à filer, surtout si elle fait des filés fins. Il est en particulier une industrie qui est fort exigeante à ce point de vue, c'est celle de l'éclairage électrique; s'il arrive que la dynamo alimentant une distribution s'écarte un peu du régime normal, aussitôt les lampes se brûlent ou cessent d'éclairer; ou bien la lumière éprouve des battements insupportables; l'uniformité de vitesse des générateurs électriques a besoin d'être sévèrement maintenue.

A l'époque où la question a commencé à se poser d'une façon un peu sérieuse, on s'est tout d'abord, comme c'était naturel, adressé à l'organe que l'on considérait comme fondamental pour la régularisation, au pendule centrifuge : on a soumis à des études

approfondies le régulateur de Watt, on l'a retouché, modifié, transformé. Ces recherches ont donné lieu à des travaux ingénieux et d'un grand intérêt : citons, parmi bien d'autres, les noms de Farcot, de Foucault, de Porter, de Rolland, etc., qui sont caractéristiques de cette période. C'est à la même date qu'il faut rapporter l'origine de cette notion de l'isochronisme des régulateurs, laquelle a donné naissance à tant de malentendus.

Lorsque les problèmes ainsi posés se trouvèrent résolus, non sans de notables efforts, on ne tarda pas à s'apercevoir qu'une partie seulement de la besogne était faite; que le régulateur n'est pas tout dans l'uniformisation du mouvement; que telle machine, qui jusque-là s'était comportée passablement, devenait indocile et prenait des allures désordonnées, si l'on venait à remplacer l'antique instrument de Watt par un régulateur soi-disant perfectionné, en particulier par un régulateur isochrone.

Les mots ont parfois un pouvoir incroyable; le régulateur, parce qu'il portait ce nom, avait été considéré comme l'organe unique de la régularisation : de là tous ces mécomptes. C'est qu'en effet ce n'est pas seulement dans le pendule centrifuge que réside la puissance régulatrice; l'appareil uniformisateur est beaucoup plus complexe; il se compose en réalité d'une chaîne d'organes qui s'étend à la machine motrice tout entière, et qui comprend notamment, outre le régulateur lui-même, la transmission à l'aide de laquelle il agit sur l'admission, le papillon ou les appareils de détente variable, le volant, dont le rôle est tout à fait prépondérant, pour venir enfin se fermer à son point de départ, par la commande à l'aide de laquelle l'arbre de couche agit sur l'axe du régulateur. Que dans cette chaîne compliquée un seul des anneaux joue imparfaitement ou soit mal conformé, immédiatement l'ensemble est défectueux et l'allure du moteur devient irrégulière.

Aujourd'hui la chose est devenue fort claire, tout au moins comme principe, et c'est là un résultat très utile du travail de ces dernières années. Cependant pour les applications, le problème est fort difficile, et pour pouvoir le résoudre par le calcul, on aurait besoin de données dont plusieurs font encore défaut. Heureusement la pratique est là pour corriger et redresser les défaillances de la théorie.

Nous venons d'énumérer quelques-uns des principaux organes qui constituent les chaînons de l'appareil régularisateur. Il ne sera pas inutile de les examiner d'un peu plus près et de se rendre compte des tendances qui prévalent aujourd'hui dans leur construction. Nous étudierons successivement, dans leurs traits généraux, le régulateur, l'appareil modificateur de la puissance, la transmission entre cet appareil et le régulateur, la commande de l'arbre du régulateur, et enfin le volant.

Les machines à allure modérée sont encore aujourd'hui gouvernées par un pendule conique, qui agit par la force centrifuge de masses pesantes tournant autour d'un axe vertical. On a généralement abandonné l'ancien pendule à bras libres, et adopté le pendule avec surcharge, qui tourne plus vite, mais qui est plus puissant et surtout

moins encombrant; du reste, suivant les idées personnelles du constructeur ou les exigences de chaque application, le système revêt des formes très variées; tantôt la surcharge est fixe et centrale, comme dans le régulateur Porter; ou bien elle est portée par un levier à bras variable, ce qui permet de modifier l'allure du moteur. On fait souvent usage de régulateurs plus ou moins isochrones, à bras croisés, comme celui de Farcot, ou à contrepoids monté sur un bras vertical, comme celui de Foucault. D'autres dispositifs sont également usités, tels que ceux de Büss, de Proell, etc.; quelquefois, l'action de la pesanteur est complétée par celle de ressorts en lames ou en hélice diversement agencés. Dans la plupart des régulateurs modernes, les excursions sont assez petites, ce qui, quel que soit le système employé, a pour effet de maintenir les écarts de vitesse entre des limites resserrées.

Pour les machines à rotation rapide, le régulateur est monté directement sur l'arbre de couche. Il se compose dans ce cas de deux masses pesantes, montées sur des bras articulés, que la force centrifuge tend à écarter de l'arbre; cette tendance est contrebalancée par des ressorts. Le plus souvent, l'appareil est installé à l'intérieur du volant, dont la jante lui sert d'enveloppe protectrice. Le dispositif que nous venons de décrire est simple, satisfaisant comme aspect; de plus, il permet de donner aux masses mobiles un poids important, et par conséquent une grande puissance à l'appareil.

Depuis quelques années, on fait assez fréquemment usage d'un régulateur, fondé sur un principe un peu différent : c'est toujours l'inertie d'une masse mobile qui entre en jeu, mais non plus sous la forme de force centrifuge. Imaginons un pendule ordinaire, oscillant dans un plan, et qui, à chaque révolution du moteur, reçoit une impulsion; l'amplitude des oscillations croît en même temps que la vitesse de rotation; suivant que cette amplitude est en deçà ou au delà d'une certaine limite, le pendule rencontre ou échappe des organes d'embrayage, lesquels agissent à leur tour sur la puissance motrice dans le sens voulu. Le dispositif que nous venons de décrire peut être d'ailleurs varié de mille façons. Ces *régulateurs d'inertie* s'adaptent d'une manière particulièrement heureuse aux machines à gaz; pour les machines à vapeur, ils sont peu employés.

Souvent, dans les usines électriques, on se donne pour objet de maintenir constante la force électromotrice aux bornes de la dynamo, et l'on utilise cette force pour régulariser l'allure des moteurs; nous en avons vu un exemple remarquable dans le turbomoteur de Parsons; du reste, le même principe a reçu des applications nombreuses et importantes, sur lesquelles nous n'insistons pas pour rester dans notre sujet.

Il a été à plus d'une reprise proposé des systèmes de régulateurs fondés sur l'inertie d'un fluide en mouvement : par exemple, l'air, déplacé par une pompe ou une turbine, et plus ou moins gêné dans son mouvement, agissait par sa pression variable sur des obstacles mobiles, qui à leur tour actionnaient la distribution. L'Exposition de 1878 comportait quelques spécimens de ces dispositifs. En 1889, ils ont à peu près disparu; on reproche à ces sortes de régulateurs de manquer de précision dans leurs effets.

Le régulateur, quelles que soient ses dispositions, agit en modifiant la puissance de

la machine motrice : quand la vitesse augmente, la puissance doit décroître, et inversement. Ces effets résultent de modifications correspondantes, soit dans la pression à l'introduction, soit dans le degré de détente; de là deux procédés : l'étranglement variable de l'amenée de vapeur et la détente variable. Des discussions se sont élevées sur les avantages particuliers que présentent l'un ou l'autre de ces procédés; des expériences ont été faites sur le même sujet, mais la question n'est pas encore tirée bien au clair.

Nous ne reviendrons pas sur les distributions à détente variable, elles ont été étudiées précédemment. Nous appellerons simplement l'attention sur un point important et déjà signalé : la plupart des régulateurs usuels ne possèdent qu'une puissance très limitée; il suffit d'une résistance minime pour les rendre paresseux et paralyser leur jeu. Il est donc nécessaire, si le régulateur agit sur une détente variable, que les organes de cette détente cèdent très facilement et sans frottements notables; les détentes à repos et surtout par déclenchement possèdent, à ce point de vue, une sérieuse supériorité.

Le premier procédé est plus simple de construction et a été pendant longtemps le seul usité : la conduite d'amenée de vapeur est étranglée, à son entrée dans la boîte de distribution, par un obturateur, qui laisse à l'écoulement du fluide un orifice de section variable; il se produit ainsi, entre la chaudière et la boîte à vapeur, une chute de pression d'autant plus forte que l'orifice est plus étranglé. Dans les machines de Watt, cet obturateur était constitué par une simple plaque ronde, oscillant autour de son diamètre, à la façon d'une clef de poêle; cet appareil est encore en usage : il porte le nom de *papillon* ou de *valve-papillon*. On en a amélioré le jeu en lui donnant la forme d'une ellipse tournant autour de son petit axe, et dont le plan, dans la position de fermeture, est très oblique sur l'axe longitudinal de la conduite; les sections d'écoulement se trouvent ainsi mieux en rapport avec les déplacements angulaires de la valve. Ainsi constitué, cet obturateur est léger, bien équilibré et son mouvement est facile.

Pour obtenir une proportionnalité plus exacte entre les passages de la vapeur et les déplacements de l'obturateur, on donne souvent à celui-ci d'autres dispositions : double piston équilibré, ouvrant une paire de lumières, tambour tournant sur son axe et percé d'orifices correspondant à des orifices en nombre pareil, pratiqués sur la paroi d'un cylindre qu'enveloppe le tambour, etc.

Quel que soit le procédé employé, détente variable ou étranglement, le problème est relativement simple tant qu'il ne s'agit que de machines à un cylindre. Il devient, au contraire, très compliqué pour les machines à expansion multiple; aussi les solutions adoptées varient d'un constructeur à l'autre : quelquefois, le régulateur agit à la fois sur plusieurs cylindres; d'autres fois, le cylindre de haute pression est seul actionné. Il faut dire, d'ailleurs, que les conditions entrant en ligne de compte sont fort nombreuses; sans qu'il paraisse possible de donner des règles bien générales, il convient de constater que, dans certains cas, on obtient une uniformité de marche très satisfaisante

avec un régulateur réglant seulement l'admission au petit cylindre; ce résultat a été réalisé principalement avec des machines à allure rapide et receiver de faible volume.

Du régulateur à l'organe modérateur de la puissance règne une transmission, dont les dispositions exercent une influence importante sur les effets du système. Pour le montrer, un exemple bien simple suffira : Supposons une machine réglée par un pendule de Watt actionnant un papillon par une transmission ordinaire; à une vitesse donnée, correspondant à une position déterminée et du pendule et du papillon, la machine fournira une certaine puissance; que si l'on vient à retoucher la transmission, de telle sorte que, pour la même position du pendule, le papillon soit plus ouvert, la puissance de la machine, pour la même vitesse, sera accrue et pourra l'être dans des proportions considérables.

Souvent, comme dans l'exemple que nous venons de citer, la transmission est desmodromique et sans frottements sensibles; en pareil cas, il existe une relation définie entre la position des organes de régularisation et le travail développé par tour du volant, ou, ce qui revient au même, le moment moteur moyen, lequel est lui-même égal au moment résistant, si l'allure est soutenue. Si donc la résistance vient à changer, la vitesse doit varier également, pour ramener l'ensemble à un nouveau régime; mais ce régime sera différent du premier : à chaque valeur de la résistance correspondra une vitesse particulière; l'uniformité d'allure ne saurait donc être maintenue.

C'est pour tourner cette difficulté que l'on a imaginé les régulateurs dits *isochrones*, qui se tiennent en équilibre quelle que soit la position des boules pour une vitesse donnée. Par contre, pour toute autre vitesse, les boules s'écartent complètement. Cette conséquence nécessaire du principe même de l'isochronisme est restée longtemps méconnue; c'est elle qui a entraîné les nombreux mécomptes auxquels nous avons précédemment fait allusion. Un régulateur isochrone avec transmission desmodromique libre ne saurait procurer qu'une allure désordonnée, laquelle se traduit d'une manière sensible par le sautillement des boules.

On peut corriger ce défaut en se servant d'un régulateur incomplètement isochrone, c'est-à-dire un peu stable, et en proportionnant en conséquence les divers éléments de la chaîne régulatrice, y compris le volant, qui, pour cette application, doit être lourd et puissant.

Sans abandonner la transmission desmodromique, on peut encore se servir d'un artifice que la pratique a révélé et dont la théorie démontre la valeur : il consiste à créer, sur le parcours de la transmission, des frottements modérés, de telle sorte que les organes ne cèdent pas immédiatement à l'effort du régulateur et que les déplacements se trouvent retardés; si les résistances passives ainsi introduites sont judicieusement pondérées, les effets seront changés du tout au tout. Avec un pendule isochrone ou presque isochrone, même si le volant n'est pas très puissant, l'allure pourra

rester régulière et les écarts de vitesse se maintiendront alors dans des limites fort étroites.

Lorsqu'une machine a une allure déréglée, par l'effet de la trop grande sensibilité du régulateur, les mécaniciens avisés savent fort bien la calmer et empêcher les boules de sautiller, en serrant modérément quelque articulation ou un presse-étoupe; mais ce procédé, délicat à bien appliquer, ne donne que des résultats désastreux entre des mains inhabiles. On l'a rendu tout à fait correct à l'aide d'un dispositif qui est aujourd'hui devenu général. Sur le parcours de la transmission est installé un *frein liquide,* lequel est constitué par un piston léger, parcourant librement un cylindre plein d'huile; un orifice étroit fait communiquer les deux fonds du cylindre; la résistance créée par l'écoulement du liquide remplace avantageusement les frottements irréguliers obtenus par le serrage des articulations, et peut d'ailleurs être modérée à volonté par l'étranglement plus ou moins prononcé de l'orifice de communication.

La force que peut exercer un régulateur ordinaire est minime; on ne saurait donc lui demander de gouverner des mécanismes un peu lourds à déplacer, tels, par exemple, que les blocs de détente de la distribution Meyer. Pour tourner cette difficulté, on a eu recours depuis longtemps au procédé ci-après. Le travail nécessaire pour modifier la distribution est pris sur l'arbre de la machine motrice, à l'aide d'une transmission; la fonction du régulateur se borne à embrayer ou à débrayer cette transmission. La course du régulateur est petite; lorsqu'il est dans sa position supérieure, l'embrayage se produit de manière à réduire l'admission; l'effet inverse a lieu pour la position inférieure; dans l'intervalle, le régulateur est libre et la détente reste fixe. Comme, dans ses excursions-limites, le régulateur ne s'éloigne que fort peu de sa hauteur moyenne, il en résulte que le régime régulier de marche ne peut s'établir qu'à la vitesse correspondant à cette hauteur. C'est pour cela qu'on a quelquefois considéré le système comme isochrone. En réalité, il est loin d'en être ainsi. Lorsque, par suite d'un changement de vitesse, la transmission se trouve embrayée, le moment moteur moyen varie à chaque tour de la machine; mais cette variation est absolument déterminée et indépendante des variations du moment résistant. Le système est donc peu propre à uniformiser le mouvement. En pratique, cette insuffisance se traduit souvent par un phénomène particulier, d'apparence bizarre mais facilement explicable : l'allure de la machine oscille lentement et passe progressivement d'une vitesse faible à une vitesse beaucoup plus grande, pour rétrograder ensuite vers la vitesse primitive; ces oscillations lentes autour du régime moyen se prolongent indéfiniment, et elles ont parfois une grande amplitude.

Le dispositif à double embrayage a été généralement abandonné; si nous avons cru devoir le rappeler, c'est non seulement à titre historique, mais surtout parce qu'il a donné naissance à un dérivé fort intéressant, le compensateur Denis, solution fort réussie sur laquelle nous aurons à revenir.

IMPRIMERIE NATIONALE.

Le double embrayage était une première tentative pour résoudre un problème qui se pose assez souvent dans les applications de la mécanique : mettre en action une force puissante à l'aide d'organes légers et peu puissants. Nous en avons décrit plusieurs solutions au cours de ces études; rappelons, entre autres, les distributions par pression de vapeur, et surtout le servo-moteur, qui constitue une solution fort complète. Le servo-moteur, ainsi que nous l'avons vu, a été employé dans plus d'une machine comme transmission entre le régulateur et le modificateur de la puissance, notamment dans les machines à grande vitesse de Farcot, dans la machine de Windsor, dans la turbine à vapeur de Parsons, etc.

Il y a encore une transmission à considérer, celle par laquelle l'arbre de couche commande l'arbre du régulateur, dans les cas du moins où ces deux arbres ne se confondent pas. Cette transmission se fait, tantôt par courroies, tantôt par engrenages. La transmission par engrenages est, en principe, bien plus satisfaisante, car elle assure un rapport rigoureux entre les vitesses des deux arbres qu'elle relie : elle présente un inconvénient pratique, c'est le bruit que font les roues dentées tournant à une grande vitesse; mais on peut l'atténuer beaucoup, par divers moyens et notamment par l'ajustage précis des engrenages.

La courroie peut glisser, tomber ou se rompre. Si elle glisse, l'allure se dérègle; ce défaut devient très sensible dans les distributions d'électricité; il se traduit par des battements dans l'éclat des lampes. La chute ou la rupture d'une courroie de régulateur peut entraîner des conséquences graves; il ne faut pas oublier que le système régulateur est en même temps un appareil de sûreté; s'il vient à manquer, la machine est exposée à s'emballer. C'est en vue de prévenir ces accidents fort sérieux, que l'on ajoute parfois à la détente variable un organe, qui ferme complètement l'arrivée de vapeur quand le régulateur est au bas de sa course; cette addition prudente ne laisse pas que de causer quelque gêne lors de la mise en train.

Pour terminer ces généralités, nous dirons quelques mots sur le rôle du volant. Dans une machine en fonction, le volant intervient de deux manières : en premier lieu, il atténue les écarts périodiques de vitesse, qui se produisent à chaque demi-révolution de l'arbre de couche, par suite de la variation incessante du moment moteur pendant l'excursion du piston; en second lieu, son action se combine avec celle du régulateur pour réprimer les écarts accidentels provenant des variations du moment résistant. La puissance d'un volant dépend de trois éléments principaux, le poids, la vitesse linéaire de la jante et la vitesse de rotation de l'arbre. Plus l'allure est rapide, moins le volant a besoin d'être lourd et de grand diamètre. Il convient également, dans l'établissement d'un volant, de tenir compte des masses des outils commandés par la machine et de celles des transmissions entre le moteur et ces outils.

Les considérations qui précèdent nous permettront d'abréger notablement la partie descriptive de la présente section.

Le régulateur à bras et à bielles croisées est toujours fort en usage. Rappelons que ce dispositif ingénieux a été proposé par Joseph Farcot en 1854.

La plupart des machines construites par MM. Weyher et Richemond (Société centrale de construction de machines, à Pantin), sont munies d'un régulateur dont la transmission est établie d'après un dispositif imaginé par M. Denis et qui porte le nom de *compensateur*.

L'appareil est représenté par la figure 155. Le régulateur *A* agit directement sur le papillon *E* par la transmission *BCD*. De plus, et c'est en cela que consiste l'invention,

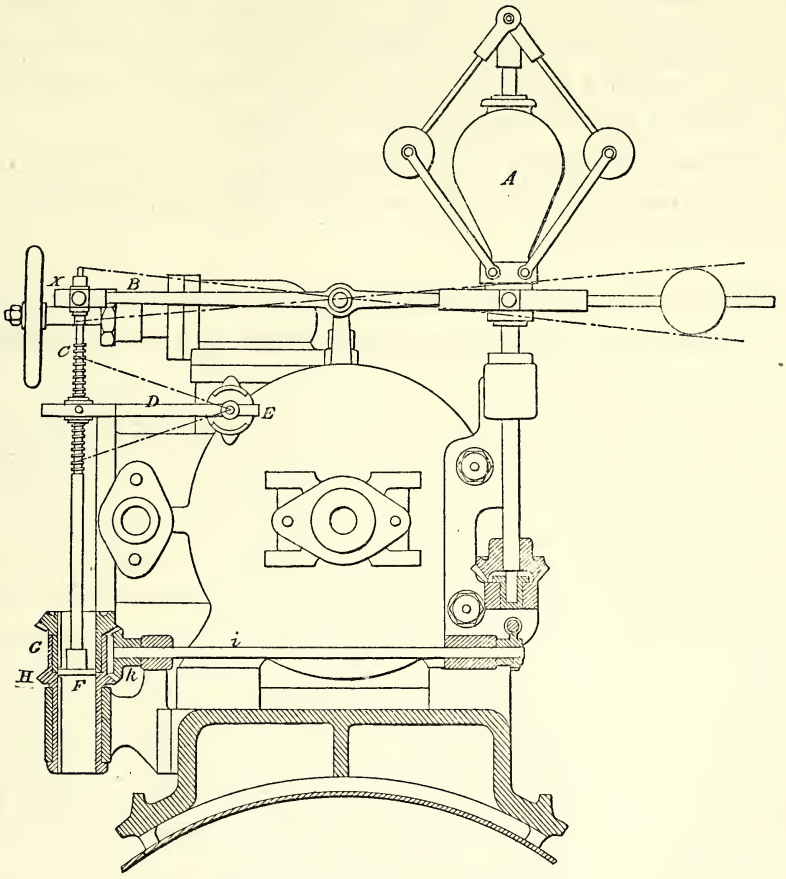


Fig. 155. — Compensateur Denis.

la tige *C* est filetée et peut tourner sur son axe, en déplaçant un écrou qui modifie l'ouverture du papillon *E*; il en résulte, suivant une remarque faite précédemment, une modification correspondante du moment moteur moyen. Cette manœuvre, dans l'appareil en question, se fait automatiquement; à cet effet, la tige *C* prolongée se termine en *F* par une came, dans laquelle viennent mordre des rainures pratiquées dans les manchons *G* et *H*; ces deux manchons, commandés par la roue d'angle *K*, tournent constamment et en sens inverse l'un de l'autre; suivant donc que la came *F* sera vers

le haut ou le bas de sa course, la vis *C* tournera à doite ou à gauche, en entraînant son écrou dans le sens correspondant. Le jeu de l'appareil se comprend facilement. La machine étant à son allure normale, la came est à mi-course et n'engrène avec aucun des deux manchons. Supposons qu'à cet instant la résistance que le moteur a à surmonter vienne, par exemple, à s'accroître : immédiatement le régulateur baisse, et ouvre plus en grand le papillon par la transmission directe *BCD*. Le régulateur étant bas, la vitesse est trop lente. Mais à ce premier temps de l'opération en succède un second : la came *F*, relevée au-dessus de sa position moyenne, se met à tourner, l'écrou de la vis *C* est entraîné, le papillon *E* s'ouvre davantage, la vitesse de la machine croît progressivement; par suite, le régulateur s'élève peu à peu, et, lorsqu'il a repris sa position normale, la came se trouve dégagée, la machine est revenue à sa vitesse de régime, mais la puissance qu'elle développe est augmentée de la quantité nécessaire pour faire équilibre à l'accroissement du moment résistant.

Cette ingénieuse transmission réunit, comme on le voit, les avantages de la commande directe et ceux de la commande par double embrayage. Elle donne, en application, de fort bons résultats.

M. V. Biétrix, de Saint-Étienne (Loire), applique sur ses machines à distributeur rotatif un régulateur fort bien combiné et qui procède des mêmes principes que le système Denis.

M. E. Büss, de Berne (Suisse), s'est consacré avec persévérance et succès à l'étude des régulateurs et, en général, des appareils fondés sur l'action de la force centrifuge. La figure 156 représente l'un de ses régulateurs. Le long de l'axe de rotation *AA* de l'appareil peut glisser la cloche *B*, qui porte dans le bas la rainure *aa*, sur laquelle vient mordre la fourchette actionnant la transmission; cette cloche porte, au moyen des articulations *C* et *C'*, les deux systèmes rigides *DCEF* et *D'C'E'F'*; chacun de ces systèmes est constitué par une boule *D*, qui agit en vertu de sa force centrifuge, et par une masse *E* qui est peu excentrée et qui joue, de concert avec la cloche *B*, le rôle de surcharge variable.

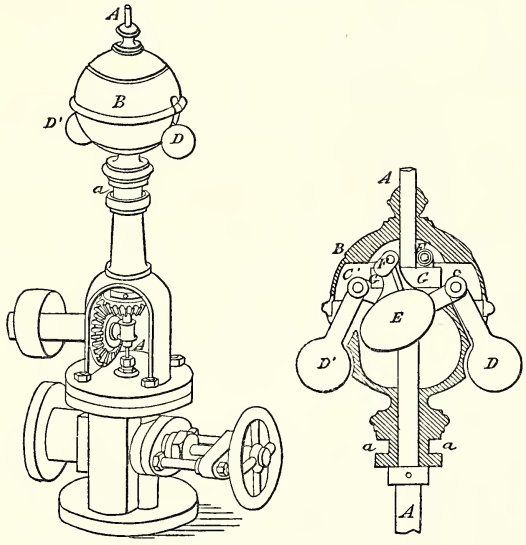


Fig. 156. — Régulateur Büss.

L'ensemble de ces deux masses, réunies par les leviers qui les solidarisent, outre son articulation en *C* sur la cloche, est soutenu par le galet *F* (ou *F'*) roulant sur le plan horizontal *GG*, lequel est fixé sur l'axe *AA*. La force centrifuge, en agissant sur *D*,

tend à soulever la cloche par le point *C*, à la façon d'un levier s'appuyant en *F*. Ce régulateur tourne à grande vitesse. La cloche *B* agit comme surcharge fixe; la masse *E* remplit le rôle du contrepoids à bras vertical de Foucault. L'appareil peut à volonté être rendu plus ou moins stable ou astatique; il suffit pour cela de quelques retouches, que l'on réalise en déplaçant légèrement le galet *F* sur le levier *FE*. Cet appareil se construit par séries, comme produit manufacturé. Il est ingénieusement agencé, fort compact et d'une construction économique.

Le régulateur Pickering, exposé par la Pickering Governor Company (États-Unis), est fort usité en Amérique pour régler la vitesse des petits moteurs. Trois boules pesantes, montées sur des lames de ressort, en déterminent la flexion par leur force centrifuge, et conséquemment le rapprochement des deux plateaux sur lesquels ils sont assemblés. La figure 157 représente cet appareil, qui tourne à grande vitesse et qui peut être disposé verticalement ou horizontalement.

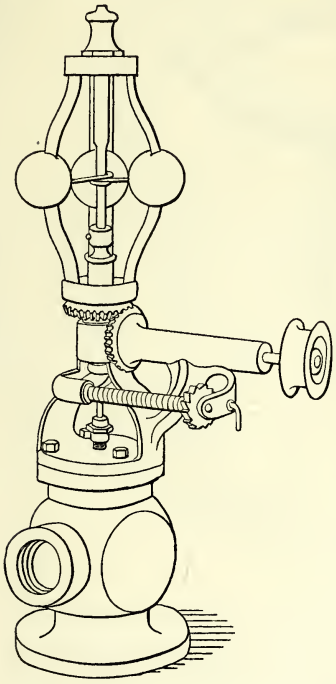


Fig. 157. — Régulateur Pickering.

Lorsque la vitesse de rotation est très grande, la force centrifuge prend des valeurs considérables, et les masses tournantes peuvent être fort légères, sans cesser de produire des effets notables. Dans ses machines rotatives, qui tournent à plus de 1,000 révolutions par minute, M. Taverdon applique, comme régulateur, un simple ballon de caoutchouc, monté sur l'axe du moteur, et qui s'aplatit suivant la ligne des pôles, lorsque la rotation devient suffisamment rapide.

Les régulateurs de Pickering et de Taverdon forment une transition toute naturelle entre les régulateurs ordinaires, dans lesquels l'action de la force centrifuge est neutralisée par la pesanteur, et les régulateurs montés sur un arbre de couche tournant à grande vitesse et dans lesquels la force centrifuge est équilibrée par des ressorts. Ce dernier système avait déjà été employé antérieurement, mais jamais sur une échelle aussi vaste et sous des formes aussi variées qu'à l'Exposition de 1889, dont ils constituaient un des caractères les plus remarqués. Les régulateurs de ce genre ne sont applicables, cela va de soi, que lorsque la vitesse de rotation est assez grande pour que les effets de l'inertie des masses excentrées l'emportent de beaucoup sur ceux de la pesanteur. Or un point matériel décrivant un cercle de 1 mètre de diamètre développe déjà, à la vitesse de 120 tours par minute, une force centrifuge de plus de huit fois son propre poids, et la proportion est quadruplée à 240 tours.

Ce sont les constructeurs américains qui ont mis en faveur les machines à grande vitesse; ce sont eux également qui ont inauguré le système de régulateur que nous étudions. Les mécaniciens des autres pays les ont suivis dans cette voie; et la plupart des machines à allure rapide de l'Exposition étaient armées de ces appareils. Nous en décrirons un certain nombre parmi les plus caractéristiques, en commençant par ceux dont la construction est simple et le fonctionnement facile à saisir.

La figure 158 représente le régulateur des machines-pilons construites par la maison

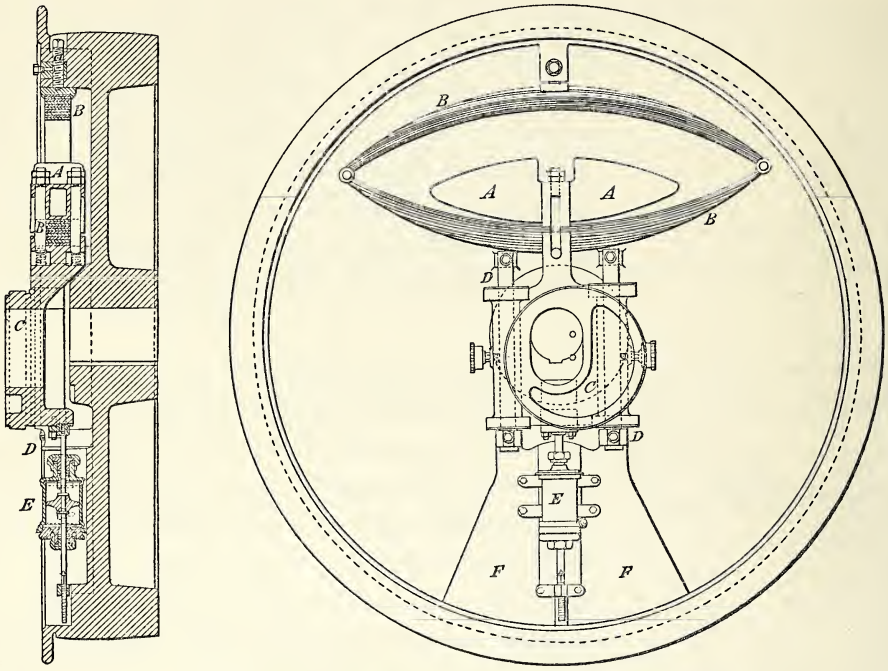


Fig. 158. — Régulateur de Lecouteux et Garnier.

Lecouteux et Garnier, de Paris. Il est installé dans le volant. La masse excentrée est en *AA*; sa force d'inertie est neutralisée par le ressort à pincette *BB*; cette masse entraîne, dans ses déplacements, l'excentrique *C*, lequel est guidé par les deux glissières rondes *DD*. Pour éviter les sautillements, on a rendu les masses mobiles solidaires d'un frein liquide *E*; il consiste en un piston se déplaçant dans un cylindre rempli d'une huile épaisse. Le système agissant sur la distribution, qui est à commande desmodromique, il faut, d'une part, qu'il soit suffisamment puissant et, d'autre part, que le distributeur ne présente qu'une faible résistance au déplacement. Pour satisfaire au premier point, on donne à la masse active *AA* un poids assez fort, et aux ressorts la raideur convenable; d'ailleurs la bande initiale de ces ressorts peut être réglée à l'aide de la vis *a*. Quant à la seconde condition, elle est remplie par la disposition du distributeur, qui est un tiroir-piston parfaitement équilibré et jouant très doux dans une glace cylindrique. Aux grandes vitesses que prennent ces machines, les masses excen-

trées donneraient au volant un balourd intolérable; on les équilibre à l'aide d'une contre-masse *FF* venue avec la masse du volant.

La petite machine à grande vitesse exposée par la maison Escher, Wyss et Cie, de Zurich, était munie d'un régulateur installé dans le volant-poulie et représenté par la figure 159. Les deux masses actives *A* et *A'* sont ramenées par les ressorts à boudin *B*

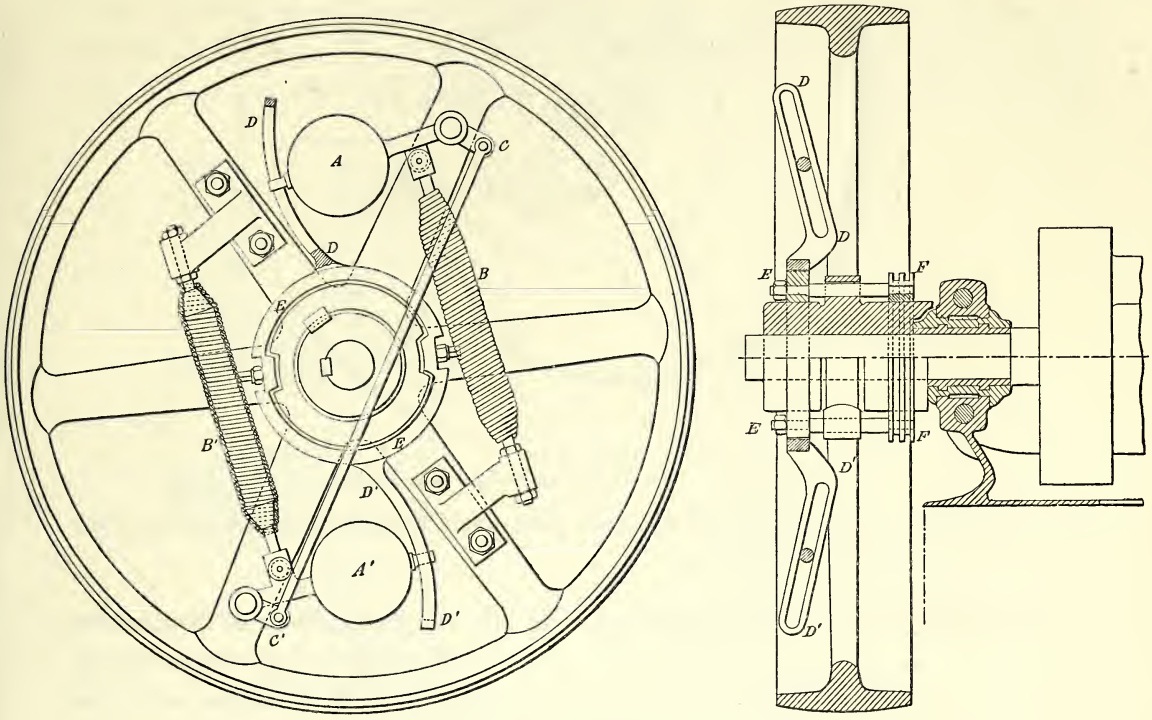


Fig. 159. — Régulateur d'Escher, Wyss et Cie.

et *B'*; leurs mouvements sont conjugués par la tringle *CC'*. L'appareil agit sur une valve d'étranglement en forme de tambour, et la transmission à cette valve est assez originale. Les extrémités des leviers qui portent les boules *A* et *A'* jouent dans des coulisses *DD*, *D'D'*, lesquelles sont obliques sur l'axe de rotation et solidaires de l'anneau *EE*; celui-ci peut glisser le long du moyeu du volant. On voit que le déplacement radial des boules produit le déplacement horizontal de l'anneau *EE*; ce mouvement est transmis à l'anneau *FF*, rendu solidaire du premier par des boulons qui traversent librement les bras du volant; l'anneau *FF* porte, sur sa jante, des rainures dans lesquelles vient mordre la fourchette qui conduit le papillon.

Le régulateur de la machine Straight Line (voir plus haut) est représenté par la figure 160. La masse active *A* est fixée sur le levier *AC*, oscillant autour de l'articulation *B*, laquelle est montée sur un bras du volant; la force centrifuge de cette masse est contre-balancée par le grand ressort *ED*, lequel agit par l'intermédiaire des deux bielles *DF* et *FC*, qui sont articulées en *F* sur la pièce *FabGcd*, oscillant autour de

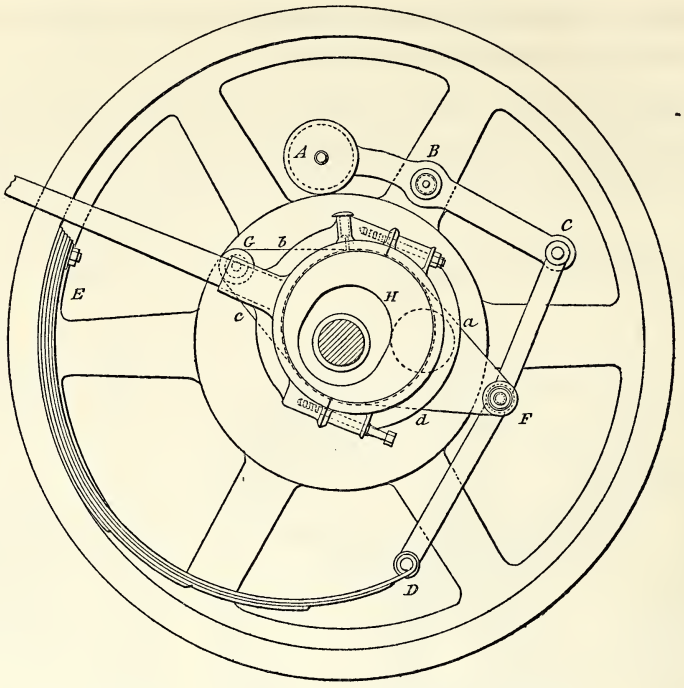


Fig. 160. — Régulateur de la Straight Line Engine.

l'axe G fixé dans le moyeu du volant; cette pièce porte l'excentrique H, lequel agit sur le tiroir d'admission équilibré.

Le régulateur de la machine Armington et Sims (fig. 161) est composé de deux masses actives A et A', rappelées par les ressorts B et B' et oscillant autour des articulations C et C', fixées au volant. La transmission au distributeur est fort originale. L'excentrique de distribution D, qui agit sur un tiroir-piston équilibré, est lui-même monté à frottement doux sur un excentrique intérieur E, capable de pivoter sur l'arbre de couche F. La figure représente l'appareil entièrement fermé, dans la position correspondant aux faibles vitesses et aux grandes admissions. Lorsque la vitesse devient suffisante, les masses actives s'écartent; par les bielles G et G', elles agissent sur la pièce $H'H$, solidaire de l'excentrique E, et celui-ci pivote sur l'arbre F; mais en même

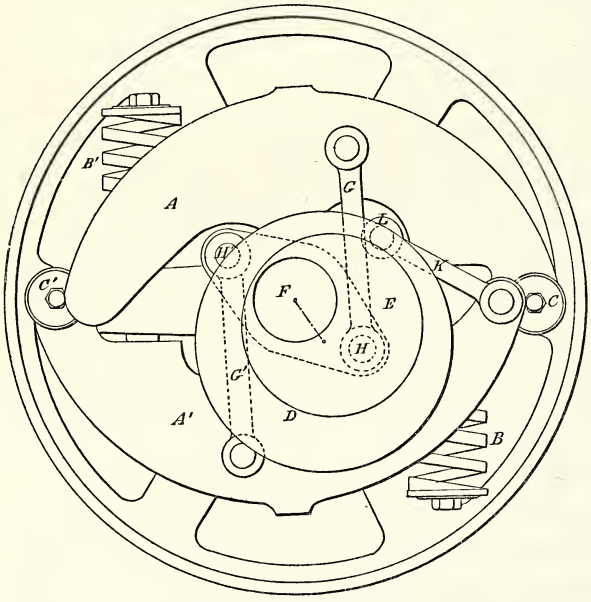


Fig. 161. — Régulateur de la machine Armington et Sims.

temps, la masse A' déplace l'excentrique de distribution D, par la bielle K articulée en L, et fait tourner cet excentrique en sens inverse du mouvement du premier. Il résulte de ce double déplacement un changement de l'avance angulaire et une diminution du rayon d'excentricité; l'admission est réduite, mais l'avance à l'admission reste à peu près constante.

Le régulateur de la machine du système Hoffmann, exposée par les Ateliers de construction d'OErlikon (Suisse), est tout à fait analogue au précédent comme principe (fig. 162) sinon comme dispositions. On se rappelle que, dans cette machine, la distri-

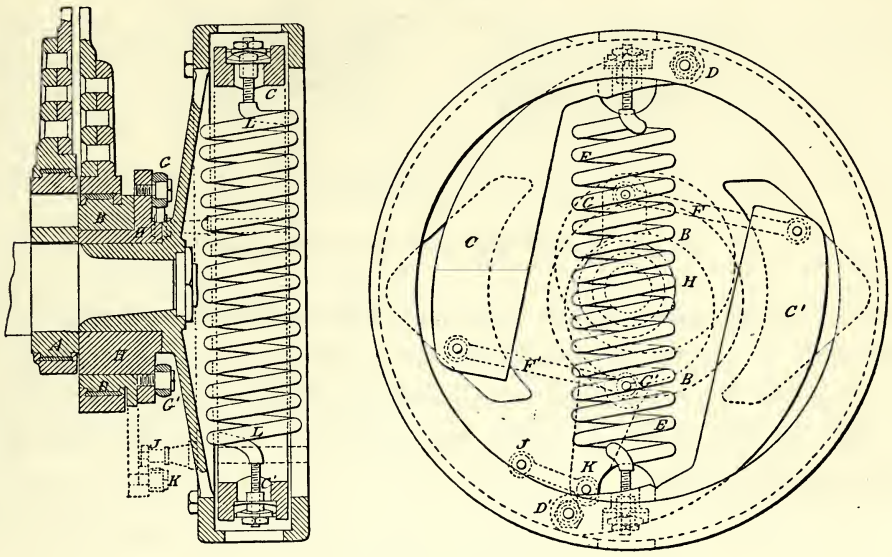


Fig. 162. — Régulateur de la machine d'OErlikon.

bution est du genre Meyer, et faite par deux tiroirs pistons circulant l'un dans l'autre; l'excentrique de distribution naturelle A est fixe; celui de détente B est au contraire à excentricité variable sous l'action du régulateur. Celui-ci est formé de deux masses C et C' oscillant autour des articulations D et D' fixées à la jante du volant; elles sont contretenues par un ressort commun EE. Ces deux masses agissent par les bielles F et F' sur la pièce pivotante GG', dont la rotation entraîne celle de l'excentrique intérieur HH; sur cet excentrique est monté à frottement doux l'excentrique de détente BB, lequel est, en outre, tenu par la bielle JK, articulée en J sur le volant et en K sur un bras solidaire de l'excentrique B.

Nous terminerons par la description du régulateur de la machine Westinghouse, précédemment étudiée; il est représenté par la figure 163. L'excentrique A oscille librement autour de B; il est tenu en C par la bielle CD, laquelle s'articule sur une des masses actives E; les deux masses E et E', articulées sur le volant en F et F', sont contretenues par les ressorts G et G' et conjuguées par la bielle HH'. La figure représente le régulateur en activité, les masses écartées pour la grande vitesse.

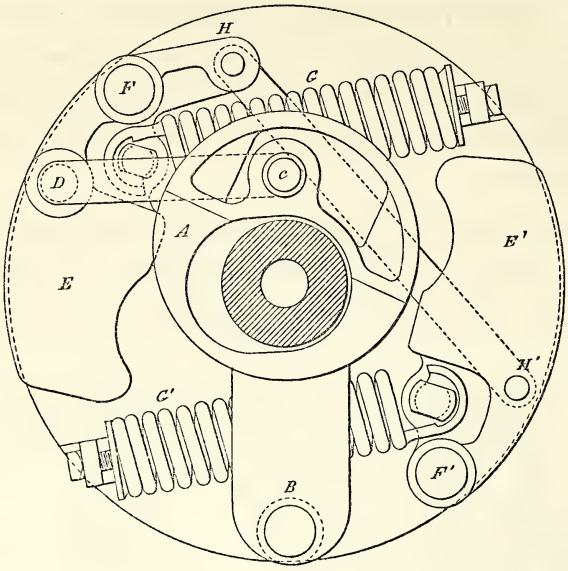


Fig. 163. — Régulateur de la machine Westinghouse.

Il existait encore nombre d'autres régulateurs à l'Exposition. Ceux destinés au service des machines à vapeur procédaient des mêmes principes que les appareils que nous venons d'étudier. Quant aux régulateurs gouvernant d'autres machines tels que moteurs à gaz ou hydrauliques, nous les retrouverons en étudiant les appareils sur lesquels ils étaient montés.

CHAPITRE V.

MACHINES THERMIQUES AUTRES QUE CELLES À VAPEUR D'EAU.

SOMMAIRE.

Généralités. — État actuel de la question. — Rendement de la chaleur. — Comparaison avec la machine à vapeur. — Conditions industrielles.

Résumé historique. — Vapeur d'eau surchauffée. — Vapeurs diverses.

Machines à air chaud. — Des régénérateurs. — Chauffage intérieur ou extérieur. — Combustibles employés : solides, gazeux ou liquides.

Machines à explosion. — Des pertes de chaleur. — Allumage. — Refroidissement. — Organes régulateurs. — Cycle à quatre temps. — Questions diverses. — De l'emploi des machines à gaz. — Résumé.

Partie descriptive. — Division.

Machines à combustible solide. — Considérations générales. — Machines à air chaud de Brown, de Bénier.

Machines à gaz à explosion sans compression. — Moteurs de Forest, de Bénier, de Bisschop.

Machines à gaz à explosion avec compression. — Généralités. — De la compression. — Beau de Rochas et Otto. — Variantes du cycle à quatre temps.

Machines avec cycle à quatre temps. — Machines Otto de la Compagnie française des moteurs à gaz, de Crossley. — Machines de Lenoir (Rouart), de Koerting-Lieckfeld (Boulet), de Delamare, Debouteville et Malandin (Powell), de Pers et Forest (Delahaye). — Distributeur Niel. — Machine de Charon.

Machines avec cycle à deux temps de Ravel, de Benz (Roger), de Baldwin (Otis), de Taylor, de Griffin.

Machines à combustibles divers.

Gazogènes. — Installation de Powell. — Gazogène Dowson (Dehaître).

Combustibles liquides. — Carburateurs de Lenoir (Rouart), de Salomon et Tenting, de Durand. — Machines des Ateliers Diederichs, de Ragot.

Appareils divers. — Pompe automatique de Backeljau. — Canot à vapeur de naphte de Yarrow.

Résumé.

Dans notre rapport sur la mécanique générale à l'Exposition de 1878, nous disions, en parlant des machines à air chaud et à gaz :

« On peut dire que, dès aujourd'hui, la machine de ménage existe, c'est-à-dire une machine produisant une petite force, ne présentant aucun danger, pouvant s'installer n'importe où, se mettant en marche promptement, fonctionnant sûrement et sans bruit, n'exigeant ni soins trop délicats, ni surveillance trop assidue. « Ce rôle de serviteur de la petite industrie, les machines à gaz l'ont conservé; à l'Exposition de 1889, la grande majorité des machines exposées étaient d'assez faible puissance, de 1 à 4 chevaux; et, même à ce point de vue, on peut constater un progrès remarquable. Plusieurs maisons se sont ingéniées pour établir de petits moteurs très simples, très légers, faciles à déplacer et à installer n'importe où, sur un plancher, sur une table, selon les besoins du moment; ces moteurs, d'une puissance de 1/2, 1/4 et même 1/8 de cheval, remplacent avantageusement le pied du tourneur ou le gamin qui tourne à la manivelle.

Nous ajoutions en 1878 : « Peut-être n'est-il pas téméraire de penser que les petits moteurs que nous étudions pourront préparer la voie à des appareils plus considérables,

tels que les avaient rêvés les premiers promoteurs des machines. Déjà le principal obstacle qui a fait échouer ces tentatives anciennes peut être considéré comme surmonté : nous voulons parler de l'ignorance des phénomènes dont les fluides élastiques sont le siège; phénomènes fort obscurs il y a quelques années et aujourd'hui bien élucidés. On sait de nos jours ce que l'on a à chercher, ce qu'il faut éviter, les limites entre lesquelles le succès peut être espéré; le champ des investigations est ainsi éclairé et défini, et c'est là un progrès dont on ne peut méconnaître la haute importance. »

Ces prévisions ont été réalisées plus promptement qu'on ne pouvait l'espérer et dans une mesure inattendue : à côté des petits moteurs domestiques, l'Exposition nous montrait un nombre respectable de moteurs caloriques d'une grande puissance, de vraies machines d'atelier. Du reste, les circonstances ont secondé d'une manière merveilleuse cette évolution. Dans les dix dernières années qui viennent de s'écouler, il s'est produit un fait d'une grande importance industrielle; nous voulons parler du développement rapide qu'a pris l'éclairage électrique. Ce fait, nous avons eu déjà plus d'une fois l'occasion de le constater, a eu son retentissement dans toutes les industries des machines thermiques. Il y avait là des conditions nouvelles, auxquelles ces machines semblaient pouvoir satisfaire mieux que toutes autres; parmi ces conditions, il s'en présente deux qui sont, dans bien des cas, tout à fait impératives.

En premier lieu, c'est la nécessité d'installer le moteur dans le voisinage des lampes à alimenter, c'est-à-dire, le plus souvent, au centre de locaux très fréquentés; en second lieu, c'est le peu de durée du service journalier. Qu'on tienne compte, en outre, de cette circonstance que, dans la plupart des éclairages privés, la force à dépenser n'est pas très considérable, et l'on verra qu'en somme le moteur thermique sans chaudière se trouve tout indiqué pour un pareil service. On voit aujourd'hui un grand nombre d'installations dans lesquelles une machine à gaz actionne les dynamos servant à l'éclairage, le consommateur trouvant encore avantage à s'éclairer indirectement à l'aide du gaz même en passant par l'intermédiaire compliqué du travail mécanique et de l'électricité.

L'éclairage électrique a donné une vive impulsion à la construction des machines thermiques, et, par une réaction naturelle, aux études dont ces machines sont l'objet. Cette impulsion se mesure par l'étendue du chemin parcouru depuis 1878 et par l'importance des résultats acquis. Nous avons vu tout à l'heure que le très petit moteur thermique se construit couramment. Dans le sens opposé, on voyait figurer, dans les halles de l'Exposition de 1889, un grand nombre de moteurs de grande puissance, 15 chevaux, 25 chevaux, 50 chevaux et même 100 chevaux. Ce sont là des résultats bien remarquables et que l'Exposition de 1878 ne faisait nullement prévoir.

Pour ces grandes machines, bien plus encore que pour les petites, une question de première importance se pose : c'est celle de l'économie dans la consommation du combustible. Le gaz est un combustible cher; si l'on en était réduit à le gaspiller, comme

on le faisait dans les anciennes machines, il est certain que l'usage des grandes puissances serait resté pratiquement inabordable. Il y a là une question toute nouvelle et qui mérite d'être étudiée de plus près.

Prenons comme exemple une machine à gaz ordinaire telle qu'on la construit aujourd'hui. Une pareille machine, convenablement conduite, et en marche industrielle, consommera au plus, par heure et par cheval effectif, 1 mètre cube de gaz, dont la combustion complète développerait en moyenne 5,300 calories.

Comparons ce résultat à ceux fournis par la machine à vapeur. Une excellente machine à vapeur de l'industrie consomme, par heure et par cheval effectif, une quantité de houille qui ne descend guère au-dessous de 1 kilogramme. Or 1 kilogramme de bonne houille à vapeur représente une puissance calorifique de 8,500 calories.

Il ne sera pas hors de propos d'insister sur les chiffres qui ont servi de base à cette comparaison. Une consommation de 1 kilogramme de houille, par heure et par cheval effectif, implique une machine à vapeur à condensation, puissante, très parfaite, très soigneusement conduite et entretenue. Il est d'ailleurs à remarquer que la machine à vapeur a aujourd'hui une existence industrielle deux fois séculaire; que les ingénieurs les plus éminents, les chercheurs les plus persévérants n'ont cessé de s'attacher à l'améliorer; qu'elle est arrivée à un degré de perfection qui ne laisse plus beaucoup de place à des progrès ultérieurs.

La machine à gaz, au contraire, est née d'hier; ses applications industrielles sont toutes modernes et infiniment moins étendues que celles de la machine à vapeur; la théorie des machines à gaz est à peine ébauchée et, de fait, l'indicateur de Watt, appliqué sur ces moteurs, montre avec toute évidence que leur fonctionnement est encore extrêmement éloigné des conditions théoriques assurant un rendement élevé. Et néanmoins avec ces moteurs, le chiffre de 1 mètre cube de gaz par cheval-heure est réalisé couramment, même pour des puissances fort modérées. Ainsi donc, au point de vue exclusif du rendement thermique, la machine à gaz, si imparfaite qu'elle soit encore, l'emporte de beaucoup sur les machines à vapeur les plus perfectionnées. C'est là un fait d'un grand intérêt, qu'il était important de rappeler dès le début de cette étude.

Cette question du rendement est sans doute loin d'être la seule à examiner; d'autres considérations doivent intervenir, qui sont parfois d'une importance plus grande encore Néanmoins, pour ne pas interrompre cet exposé, nous allons l'étudier plus en détail, et rechercher comment il peut se faire que le rendement d'un moteur thermique quelconque, d'une machine à gaz par exemple, puisse être beaucoup plus élevé que celui des meilleures machines à vapeur. A cet effet, nous analyserons le fonctionnement d'une machine à vapeur, considérée comme machine thermique, et nous étudierons comment se répartit la chaleur qui lui est communiquée.

Prenons, comme plus haut, une très bonne machine à vapeur à condensation,

consommant, par heure et par cheval effectif, 1 kilogramme de bonne houille pour vapeur.

Un cheval-vapeur travaillant pendant une heure représente une quantité de travail de

$$75 \times 60 \times 60 = 270{,}000 \text{ kilogrammètres.}$$

Un kilogramme de bonne houille correspond, comme pouvoir calorifique, à 8,500 calories.

Or, en vertu des principes de la théorie mécanique de la chaleur, on sait qu'une calorie représente 425 kilogrammètres; si donc ces 8,500 calories pouvaient être transformées en puissance mécanique utilisable, le travail correspondant serait de

$$8{,}500 \times 425 = 3{,}612{,}500 \text{ kilogrammètres.}$$

Le rendement dynamique de la machine à vapeur considérée comme machine thermique n'est donc que de

$$\frac{270000}{3612500},$$

soit 7 1/2 p. 100 environ.

Ainsi, sur 100 calories confiées à une pareille machine, elle n'en rend, sous forme de travail, que 7 1/2; le reste, soit 92 calories 1/2, se perd sous diverses formes.

Il ne sera pas sans intérêt d'examiner la façon dont s'opèrent ces énormes déperditions, d'établir le bilan de cette machine si perfectionnée et cependant si prodigue.

Un moteur à vapeur se compose d'une chaudière, qui produit la vapeur, d'un récepteur, constitué lui-même par le cylindre et le piston, et d'une transmission allant du piston à la poulie ou à la roue de commande. Chacun de ces éléments intermédiaires est le siège d'une perte de travail à l'état calorifique ou à l'état dynamique; ce sont ces pertes que nous allons analyser :

1° Sur 100 calories virtuellement contenues dans le combustible consommé, une partie seulement pénètre dans la chaudière pour y faire de la vapeur; le reste se disperse sous forme de fumées chaudes, de matières mal brûlées, par radiation, par conductibilité, etc.; le rendement industriel des bonnes chaudières ne dépasse guère 60 p. 100; la quantité de chaleur parvenant à la machine sera donc au plus de

$$0{,}60 \times 100 = 60 \text{ calories.}$$

2° Le récepteur reçoit la vapeur de la chaudière à une certaine température; elle transforme en travail une partie de cette chaleur; le reste s'en va au condenseur.

Supposons d'abord notre machine absolument parfaite; elle n'utilisera néanmoins qu'une fraction de la chaleur qui lui est communiquée, et la théorie de la chaleur démontre que cette fraction, appelée souvent *coefficient économique*, dépend exclusivement des températures de la chaudière et du condenseur; plus l'écart entre ces températures

est faible, plus le coefficient économique est petit. Dans le cas pris comme exemple, on peut compter le coefficient économique pour 0,27 [1].

Sur les 60 calories délivrées à la machine, la fraction qu'un récepteur parfait transformerait en travail serait de

$$0{,}27 \times 60 = 16 \text{ cal. } 2.$$

3° Mais notre récepteur est loin d'être parfait : la détente et la compression sont incomplètes; il y a des laminages de vapeur, des pertes de chaleur, des condensations, etc.; de là, la nécessité d'introduire un nouveau coefficient, réduisant le travail du récepteur; si l'on évalue ce coefficient à 0,60, le récepteur ne rendra que 0,60 du travail théorique, ce qui correspond à

$$0{,}60 \times 16{,}2 = 9 \text{ cal. } 72.$$

4° Enfin il y a les frottements et les résistances passives, nécessitant l'introduction d'un nouveau coefficient, que l'on appelle souvent *coefficient de rendement organique,* et qu'on peut porter à 0,77; il nous reste, en définitive,

$$9{,}72 \times 0{,}77 = 7 \text{ cal. } 50,$$

que nous recueillerons sur l'arbre de couche, sous la forme de travail utilisable.

Pour ne constituer qu'une approximation évidemment grossière, les chiffres ci-dessus ont cependant une utilité, en ce qu'ils donnent une idée de l'ordre de grandeur des quantités qu'ils représentent. En les rapprochant les uns des autres, nous obtenons le tableau ci-après :

DÉSIGNATION.	COEFFICIENTS PARTIELS.	CALORIES	
		RESTANTES.	PERDUES.
Chaleur du combustible	1.00	100.00	0.00
1° Passage dans la chaudière	0.60	60.00	40.00
2° Coefficient économique	0.27	16.20	43.80
3° Imperfection du cycle	0.60	9.72	6.48
4° Rendement organique	0.77	7.50	2.22
RENDEMENT EN TRAVAIL	0.075	7.50	92.50

[1] Le coefficient économique a pour valeur

$$\frac{t_1 - t_0}{273 + t_1};$$

t_1, température à la chaudière; t_0, température au condenseur.

Au cas actuel, on peut admettre :

Une chaudière timbrée à 5 kilogr., soit $t_1 = 158°$;

Un condenseur à la température de 40 degrés, soit $t_0 = 40°$.

Il vient ainsi, pour le coefficient économique,

$$\frac{158 - 40}{273 + 158} = 0{,}27.$$

Ici, comme plus haut, le travail utilisé ne représente que 7 1/2 p. 100 de la chaleur contenue dans le combustible. La faible valeur de cette utilisation s'explique par deux raisons principales.

La première raison est le nombre de transformations que la chaleur doit subir avant de ressortir à l'état de travail : il faut qu'elle se dégage du combustible, qu'elle pénètre dans la chaudière pour former de la vapeur, que cette vapeur se rende au cylindre et agisse sur le piston; le travail ainsi engendré est recueilli sur l'arbre de couche à l'aide d'une transmission compliquée. Chacune de ces transformations comporte son rendement particulier. Ces nombreux coefficients, malgré la perfection relative de chacun des organes, sont tous nécessairement plus petits que l'unité; leur produit, qui est le rendement final, est donc forcément assez faible. L'énergie se disperse et s'épuise en passant de l'un à l'autre des anneaux de cette chaîne longue et compliquée.

En second lieu, on remarquera en particulier la faible valeur de l'un de ces facteurs du rendement final : il s'agit du *coefficient économique,* évalué ci-dessus à 0,27. Ce coefficient est petit parce que les températures entre lesquelles évolue la machine à vapeur sont peu écartées l'une de l'autre. Entre la température de la chaudière (158 degrés dans l'exemple ci-dessus) et celle du condenseur (40 degrés), l'écart n'est que de 118 degrés.

Serait-il possible d'augmenter cet écart?

Du côté du condenseur, il y a peu de chose à gagner.

Du côté de la chaudière, l'emploi des hautes pressions permet de gagner quelques degrés; mais on est vite arrêté dans cette direction, à cause de la rapidité avec laquelle s'élèvent les tensions de la vapeur d'eau saturée, dès qu'on dépasse un peu les températures usuelles. Au point de vue de la thermodynamique, l'usage de la triple et de la quadruple expansion, permettant l'emploi de pressions initiales plus élevées, correspond à une amélioration importante du coefficient économique. Toutefois, l'amélioration ainsi obtenue ne saurait être indéfinie; l'application de températures un peu fortes à la vapeur saturée se heurte contre la loi physique des tensions de ce fluide, et il n'est pas à prévoir que cet obstacle puisse être de sitôt surmonté.

En réalité, la principale chute de température se produit entre le foyer et la chaudière; elle se mesure par 1,000 ou 1,200 degrés, et, au point de vue du coefficient économique, elle reste complètement inutilisée. Telle est la cause capitale du faible rendement thermique de nos machines à vapeur modernes.

Le tableau ci-dessus pourrait encore donner matière à de nombreuses et intéressantes observations, mais il est temps de quitter la machine à vapeur et d'entrer dans l'étude des autres moteurs thermiques.

La théorie de ces moteurs a une histoire bien singulière; c'est un exemple remarquable des oscillations que subissent nos connaissances, des tâtonnements, des retours par lesquels elles ont à passer, avant de s'engager dans le sentier de l'application pratique.

Lorsque la machine à vapeur eut pris enfin sa place dans l'industrie et que, comme

aujourd'hui pour les autres moteurs thermiques, la question d'économie vint à se poser, tous les physiciens furent frappés de la quantité considérable de chaleur qui s'échappait du condenseur, sous forme d'eau chaude : le charbon brûlé a pour effet principal, pour effet presque unique, de chauffer l'eau de condensation. Cette déperdition énorme était attribuée à l'absorption de chaleur exigée par le changement d'état du liquide, à ce que l'on appelait la *chaleur latente de vaporisation*. De grands efforts furent faits pour l'atténuer; on chercha notamment à économiser la chaleur latente, en se servant, comme fluide moteur, de gaz permanents, d'air atmosphérique. Ces tentatives, répétées avec persévérance et par les ingénieurs les plus distingués, donnèrent l'essor à des expériences nombreuses et aboutirent à des échecs retentissants.

Dans l'intervalle s'était constituée la nouvelle science de la chaleur dans ses relations avec le travail, la thermodynamique : elle avait établi ses théories, créé ses méthodes et était cultivée avec ardeur par une pléiade de savants éminents. On crut découvrir, dans les notions fondamentales de la thermodynamique, la raison des insuccès auxquels avaient abouti les machines à air chaud et autres analogues; c'était une raison de principe, et par suite, croyait-on, péremptoire; la théorie démontre, en effet, que ce rendement particulier que nous avons défini plus haut sous le nom de *coefficient économique* dépend uniquement des températures extrêmes entre lesquelles évolue le fluide moteur dans une machine thermique, qu'il est absolument indépendant de la nature même de ce fluide. En d'autres termes, si l'on compare entre eux deux moteurs thermiques, l'un à vapeur d'eau, l'autre actionné par un corps quelconque, gaz, vapeur, liquide ou autre, en supposant que les deux machines soient également parfaites et travaillent entre les mêmes températures, leur rendement dynamique sera le même, c'est-à-dire que, pour une même quantité de chaleur consommée, elles produiront la même quantité de travail.

Ce théorème est aussi certain que les principes physiques sur lesquels il s'appuie. Toutefois si, en lui-même, il prête peu à la critique, il en est tout autrement des conséquences qu'on a cherché parfois à en déduire. On a dit, par exemple : puisque le rendement est le même, quel que soit le fluide intermédiaire, il importe peu que ce fluide soit une vapeur ou un gaz quelconque; or la vapeur d'eau est, pratiquement parlant, le fluide le plus commode à manier; c'est donc celui qui permettra de se rapprocher le plus près des conditions théoriques de maximum de rendement; la machine à vapeur d'eau présente donc *a priori* une supériorité telle, qu'il devient inutile de poursuivre l'étude des autres moteurs thermiques. Nous n'avons pas à insister sur le vague et le défaut de rigueur d'un pareil raisonnement, qui a cependant été longtemps accepté comme concluant. A ces déductions décourageantes, la pratique a répondu d'une manière victorieuse; et nous avons vu plus haut que, malgré toutes leurs conditions générales d'infériorité, certaines machines à gaz possèdent un rendement dynamique bien supérieur à celui des meilleures machines à vapeur. Mais il importe de se rendre compte des raisons de cette supériorité.

IMPRIMERIE NATIONALE.

Les énormes déperditions de chaleur que l'on constate dans les machines à vapeur se rapportent, avons-nous dit, à deux causes générales :

En premier lieu, la multiplicité des transformations que la chaleur doit subir avant de revêtir sa forme finale de puissance dynamique;

En second lieu, la faiblesse du coefficient économique, résultant du peu d'écart qui existe entre les températures que possède le fluide à l'admission et à l'échappement.

Est-il possible, en se servant de l'air comme fluide moteur, d'échapper à ces deux causes de déperdition?

A cette question, la pratique a répondu d'une manière nette et affirmative : les deux problèmes sont résolus dans le fonctionnement des machines à gaz.

Ainsi, en premier lieu, dans ces machines, le fluide moteur reçoit directement l'action de la chaleur, il agit directement sur le piston; la chaleur n'a plus à passer du foyer au métal, du métal à l'eau; plus de chaudière, plus de tuyauterie compliquée; la chaîne des transformations se trouve singulièrement raccourcie et simplifiée.

En second lieu, le fluide agit à la température même de combustion; l'énorme chute de température existant entre le foyer et la chaudière se trouve dès lors supprimée. De ce fait résulte une élévation considérable du coefficient économique; de 0,25 ou 0,30, il passe à 0,70 ou 0,80. C'est là, et là seulement, sans nul doute, que se trouve le secret du rendement élevé de ces sortes de moteurs, car sur d'autres points ils sont encore bien inférieurs aux machines à vapeur les plus médiocres.

Les considérations qui précèdent peuvent se résumer en un mot : la vapeur d'eau saturée possède des propriétés physiques qui ne permettent pas, dans les moteurs tels qu'ils sont construits de nos jours, d'obtenir des rendements élevés; rien ne semble s'opposer à ce que d'autres fluides, doués de propriétés physiques différentes, permettent d'atteindre ce but.

Cette question du rendement dynamique, de l'économie dans l'emploi de la chaleur a, par elle-même, une importance tellement grande, qu'elle a plus d'une fois fait oublier les autres conditions auxquelles un moteur industriel doit satisfaire et qu'il n'est nullement permis de négliger. De là de nombreux mécomptes, de graves désaccords entre les indications d'une théorie incomplète et les résultats des applications pratiques.

Une première considération s'impose tout d'abord : quand on parle d'économie, en matière industrielle, il ne s'agit pas d'économie de chaleur, mais d'économie d'argent. Or la dépense à faire pour dégager de la chaleur résulte, non seulement du nombre de calories obtenues, mais encore du prix de revient de chacune de ces calories. Ce prix de revient est lui-même la résultante d'un grand nombre d'éléments, parmi lesquels figure, en première ligne, le prix du combustible : une calorie de houille ne coûte pas le même prix qu'une calorie de gaz. Il faut aussi tenir compte des procédés mis en œuvre pour dégager la chaleur, des frais de main-d'œuvre, de l'entretien, des intérêts et de l'amortissement applicables aux appareils, aux bâtiments qui les abritent

et au terrain qui les supporte, etc. Il est donc impossible d'affirmer *a priori* qu'un moteur à rendement thermique élevé soit nécessairement économique.

L'économie pratique elle-même est loin d'être la seule question à considérer dans la production du travail; il y en a d'autres, d'importance égale et souvent supérieure. Avant tout, un moteur thermique doit faire sa besogne, son *duty*, comme disent les Anglais. Si cette besogne est faite régulièrement, consciencieusement, pourrait-on dire, c'est le principal; si, par surcroît, elle est faite économiquement, c'est évidemment préférable; mais, dans bien des cas, l'extrême économie dans la production du travail mécanique n'est qu'un avantage secondaire; elle ne prend le premier rang que dans certaines applications tout à fait spéciales.

Les qualités que l'industrie exige d'un moteur dépendent, en premier lieu, de l'emploi auquel il est destiné; tel moteur qui donnerait toute satisfaction dans une application déterminée serait dans un autre cas complètement inutilisable.

A ce point de vue, il convient, dans une étude d'ensemble, de s'en tenir à la discussion des propriétés d'un ordre assez général. C'est ce que nous allons essayer de faire.

La régularité d'allure est souvent une nécessité de premier ordre, particulièrement dans les applications à l'éclairage électrique; comme régularité de marche, les bonnes machines à vapeur laissent peu à désirer; on n'en saurait toujours dire autant des moteurs à gaz, qui ont, dans certains cas, donné de ce fait lieu à de sérieux mécomptes. La question de l'espace occupé est souvent de grande importance; la machine à vapeur, considérée en elle-même, est arrivée aujourd'hui à un degré de compacité qu'il semble difficile de surpasser; mais la chaudière qui l'accompagne nécessairement est encombrante; de sorte qu'à ce point de vue, les autres moteurs thermiques peuvent soutenir facilement la comparaison.

Des remarques analogues trouvent leur place en ce qui concerne la légèreté, qualité essentielle dans tous les cas où le moteur se déplace en même temps que le point d'application de l'effort qu'il exerce; il en est ainsi pour les machines de navigation, de chemin de fer, de tramways, et surtout pour l'aérostation; la lourde chaudière devient alors un *impedimentum* fort gênant, qui s'aggrave encore lorsqu'il s'agit d'emporter un certain approvisionnement de charbon et d'eau. Néanmoins jusqu'ici, surtout pour les grandes puissances, la machine à vapeur semble encore l'emporter, comme légèreté, sur les autres moteurs thermiques, grâce aux perfectionnements remarquables qui ont été apportés à ses divers organismes. Mais il est difficile d'affirmer que cette supériorité se maintiendra longtemps.

Certaines machines thermiques n'exigent pas d'eau pour leur fonctionnement; c'est là une qualité qui peut être précieuse dans bien des circonstances, notamment en vue des usages agricoles.

La machine à vapeur ne peut fonctionner qu'une fois la chaudière en pression; la montée en pression exige un temps plus ou moins long; c'est, dans certaines applica-

tions, un inconvénient de premier ordre. La plupart des autres moteurs thermiques échappent à cette sujétion. Une machine à gaz, par exemple, se met en marche en un instant; elle est toujours prête à fonctionner et ne consomme qu'autant qu'elle travaille.

Il est une question capitale : c'est celle de la sécurité.

Une chaudière à vapeur est un réservoir de puissance dynamique, qui n'est pas sans offrir de sérieux dangers; aussi les pouvoirs publics ont-ils dû intervenir et veiller à ce que l'établissement de ces magasins d'explosions compromissent le moins possible la sécurité publique. De là des difficultés, même des impossibilités absolues pour beaucoup d'installations. Les autres moteurs thermiques ne présentent pas ces dangers, et leur emploi ne saurait, en aucune façon, inquiéter le voisinage. Des diverses causes qui, dans les dernières années, ont contribué à propager l'industrie des machines à gaz et à air chaud, la considération de la sécurité a peut-être été une des plus efficaces.

En dehors de la vapeur d'eau saturée, l'air atmosphérique est le seul agent pratiquement utilisé dans les moteurs thermiques modernes; ils sont tous des moteurs à air chaud.

Mais la question a fait des progrès si considérables dans les dernières années, qu'on peut craindre de voir oublier les phases lentes et souvent pénibles de son évolution; le moment semble venu de jeter un coup d'œil sur le passé et de poser quelques jalons permettant de mesurer le chemin parcouru. L'histoire des échecs de l'industrie est souvent plus instructive que celle de ses victoires.

Nous dirons quelques mots des tentatives qui ont été faites pour utiliser, comme agents moteurs, d'autres fluides que ceux actuellement en usage.

Parlons tout d'abord de la vapeur d'eau surchauffée, dont les propriétés physiques diffèrent notablement de celles de la vapeur d'eau ordinaire.

A côté des qualités précieuses qui l'ont fait adopter d'une manière générale dans les machines thermiques, la vapeur d'eau saturée présente un inconvénient sérieux : sa pression s'élève très vite avec sa température. De là, comme on l'a vu, une conséquence grave : le rendement thermique des machines à vapeur d'eau saturée est nécessairement faible.

On peut théoriquement, et on l'a bien souvent essayé pratiquement, tourner cet inconvénient : il suffit pour cela, une fois la vapeur produite, d'y ajouter de la chaleur sans augmenter sa pression; à cet effet, on fait passer la vapeur saturée dans un tuyau ou serpentin plongé, soit dans les fumées, soit dans les flammes du foyer : c'est un chauffage par transmission; le fluide ainsi fabriqué est envoyé dans un récepteur à piston.

On peut, dans l'emploi de la vapeur d'eau surchauffée, distinguer deux cas : ou bien la surchauffe est modérée, ou bien elle est très élevée.

La vapeur d'eau très surchauffée n'a pas jusqu'ici réussi dans les machines : elle brûle les lubrifiants et fait gripper les surfaces frottantes; elle présente ainsi une partie des inconvénients qui ont retardé pendant si longtemps l'essor des machines à air chaud : le succès de la vapeur surchauffée semble donc dépendre, avant tout, de la découverte d'un lubrifiant qui ne se laisse pas attaquer par ce fluide. Lorsqu'il s'agit d'une surchauffe modérée, la question est tout autre : ainsi qu'il résulte des études de M. G. A. Hirn, il se produit une condensation partielle à l'entrée dans le cylindre, de sorte que, sauf certains avantages accessoires au point de vue du rendement, l'on rentre ici dans le cas de la vapeur saturée. Mais il est difficile de régler le degré de surchauffe, eu égard aux variations de vitesse et de température des flammes ou des fumées; il en résulte que la surchauffe est tantôt excessive, et alors la machine grippe, tantôt insuffisante, c'est-à-dire sans effet.

Les moyens essayés pour parer à cet inconvénient se sont montrés impuissants. L'un des plus ingénieux consiste à fabriquer le fluide par un mélange dosé de vapeur saturée et de vapeur très surchauffée; la proportion de vapeur surchauffée se règle, à l'aide d'appareils automatiques, d'après la température du mélange obtenu.

Jusqu'ici l'emploi de la vapeur surchauffée ne s'est pas répandu; toutefois rien ne prouve que les difficultés qu'on a rencontrées soient insurmontables, et il est possible que l'avenir nous apprenne à nous servir de ce fluide, qui est doué de propriétés si précieuses.

Depuis les tentatives remarquables et persévérantes de du Tremblay, l'emploi des vapeurs autres que la vapeur d'eau ne semble plus avoir été essayé avec quelque suite. En dehors des difficultés inhérentes au problème posé par l'éminent ingénieur, l'échec peut être attribué, pour une large part, à des circonstances étrangères au système en lui-même. Les progrès si rapidement réalisés dans la construction des machines marines, la commande directe de l'hélice, la condensation par surface, l'usage de hautes pressions, la double et triple expansion, ont permis d'atteindre des résultats que du Tremblay n'avait jamais pu obtenir, et ont frappé ses recherches de stérilité industrielle.

Du Tremblay avait essayé les vapeurs de corps très volatils : l'éther, le chloroforme. D'autres après lui ont suivi la même voie et ont proposé l'ammoniaque, l'acide sulfureux, le sulfure de carbone, même l'acide carbonique. Ces recherches n'ont pas jusqu'ici amené de résultats pratiques; toutefois il semble que le dernier mot soit loin d'être dit.

Ce qui limite les services que peut rendre la vapeur d'eau saturée, ce sont, avons-nous dit, les relations qui existent entre sa pression et sa température; aux températures élevées correspondent des pressions excessives, aux températures modérées des pressions insuffisantes. De là un double inconvénient, le rendement thermique est faible et les dimensions des appareils deviennent exagérées. En disposant, à la suite de

la machine à vapeur ordinaire, une machine actionnée par la vapeur d'un liquide très volatil, du Tremblay supprimait le second inconvénient; sa machine se rapprochait, par certains points, de la machine compound moderne; mais elle était, théoriquement parlant, bien plus satisfaisante en ce qui concerne les dimensions du cylindre de détente. D'autre part, il paraît peu probable que l'on arrive à trouver réunis, dans un fluide unique, les propriétés physiques nécessaires pour qu'il puisse travailler, sous des pressions modérées, successivement à haute et basse température. La combinaison de deux vapeurs est donc une solution qui présente quelque chance de succès et qui mérite d'être étudiée.

Il va de soi qu'à côté de la question des tensions, d'autres questions d'ordre pratique doivent intervenir. La solution de ces problèmes d'application n'a été donnée qu'imparfaitement par du Tremblay; c'est là une autre cause des échecs qu'il a éprouvés. Quoi qu'il en soit, il semble hors de doute qu'en vue de la production du travail, des études bien dirigées relatives aux propriétés physiques des vapeurs peuvent conduire à des résultats d'un véritable intérêt.

Tout récemment, on a proposé, pour de petites forces, de faire usage de vapeur de pétrole; comme nous le verrons plus bas, la question reste encore à l'étude.

Arrivons aux machines à air chaud.

Considéré au point de vue purement théorique du rendement thermique maximum, l'air ne diffère en rien de n'importe quel autre fluide. Entre deux mêmes températures, le cycle de rendement maximum, ou cycle de Carnot, conduit au même coefficient économique, quel que soit le fluide intermédiaire. Mais lorsqu'on arrive à l'application, il en est tout autrement. La réalisation pratique du cycle de Carnot, à l'aide d'un gaz permanent, exigerait des cylindres de dimensions absolument inadmissibles, ou bien des pressions très considérables, quand bien même on se contenterait d'une figuration grossière du cycle. A ce point de vue, l'air est absolument inférieur à la vapeur.

Les très fortes pressions n'ont pas été essayées dans les machines à air chaud, à cause de la difficulté de tenir les joints. Quant aux grands cylindres, ils coûtent cher et entraînent des résistances passives énormes. En somme, les machines à air chaud en usage ont, toutes choses égales, des dimensions bien plus grandes que les machines à vapeur de même puissance, et cependant leur cycle s'éloigne encore beaucoup de celui de Carnot.

Nous venons de parler des joints : c'est là un des points qui dominent toute la question. S'il est déjà difficile de tenir un joint étanche contre l'air froid à pression modérée, cette difficulté devient presque insurmontable lorsqu'il s'agit d'air chaud à haute pression. On a essayé, jusqu'ici, de la tourner plutôt que de la résoudre, et les tentatives n'ont pas toujours été heureuses. Réduire les dimensions et faire des joints étanches, voilà les deux problèmes qui se posent d'eux-mêmes, toutes les fois qu'on étudie un moteur thermique. Que si, en outre, on cherche à obtenir un rendement

élevé, c'est-à-dire à faire usage de hautes températures, alors la question des joints se complique d'une façon presque décourageante.

Il est cependant un procédé qui permettrait de tourner cette difficulté. Le cycle de Carnot procure le rendement thermique maximum ; on a cru pendant longtemps qu'il était le seul qui jouît de cette propriété; de là cette idée, qu'une machine à air chaud donnant un rendement acceptable devait nécessairement avoir des dimensions démesurées. Une étude plus attentive a montré qu'à côté du cycle de Carnot, d'autres modes de fonctionnement permettent de réaliser le rendement maximum, grâce à l'emploi de ces appareils ingénieux que l'on a appelés *récupérateurs, régénérateurs de chaleur, tamis respiratoires,* etc. Sur une machine à air chaud munie de ces appareils, les diagrammes d'indicateur peuvent se rapprocher de ceux fournis par une machine à vapeur. Comme conséquence, les régénérateurs permettent, tout en conservant un rendement élevé, de diminuer dans une forte proportion les dimensions des cylindres.

Les régénérateurs, proposés par Robert Stirling au commencement de ce siècle, appliqués depuis lors par Ericson, Franchot et d'autres encore, ont disparu à peu près complètement, malgré tous leurs avantages théoriques, et ne se retrouvent plus guère aujourd'hui que dans quelques machines de faible puissance. La raison de cet insuccès semble être d'ordre tout à fait pratique. On n'a pas su, jusqu'à présent, construire un régénérateur satisfaisant à toutes les conditions exigées; un appareil de cette nature devrait être fait d'une matière qui résistât sans altération aux températures élevées et aux courants violents de gaz; il devrait offrir au fluide qui le parcourt de grandes surfaces de contact, en même temps que de larges sections de passage, et tout en n'occupant qu'un volume très restreint, de manière à ne pas augmenter démesurément les espaces nuisibles. La réussite d'une pareille construction ferait sans doute faire un grand pas à la question des machines à air chaud.

Il est aussi un autre point qu'il importe d'examiner : c'est le procédé mis en œuvre pour élever la température de l'air. Dans un grand nombre de systèmes de machines à air, le fluide, enfermé dans un récipient métallique, est chauffé au moyen d'un foyer extérieur, par transmission à travers les parois du récipient. Ce mode de chauffage est fort commode; la pureté de gaz n'est pas notablement altérée, le chauffage se fait sans difficulté et le combustible peut être de qualité ordinaire et à bas prix.

Mais au point de vue de l'emploi de la chaleur, le système est moins satisfaisant : la paroi métallique transmet assez mal la chaleur à l'air, beaucoup plus mal que dans les chaudières à vapeur, où la transmission se fait de la tôle au liquide, sans chute notable de température. De plus, la surface de chauffe est presque nécessairement insuffisante. Aussi l'utilisation de la chaleur du combustible est-elle fort médiocre. D'autre part, le métal ne peut communiquer à l'air, avec lequel il est en contact, des quantités un peu importantes de chaleur, qu'à la condition d'être beaucoup plus chaud que lui; mais aux températures élevées, il perd sa résistance et s'altère rapidement.

Pour ménager les enveloppes, il faut donc modérer le chauffage et, par suite, renoncer à donner à l'air les hautes températures qui seules permettraient d'obtenir un rendement thermique satisfaisant. Ces sortes de machines ne semblent donc convenir que pour le cas de petites forces, lorsque la question d'économie n'est qu'accessoire et que la question de commodité est prédominante.

Pour obtenir des rendements élevés, il convient que la combustion se fasse directement à l'intérieur de la machine; dans ce cas, l'air devient à la fois moteur et comburant; la température maxima qu'il atteint n'est autre que la température de combustion.

Cette combinaison offre en théorie des avantages importants; mais elle présente, à l'application, des difficultés sérieuses.

S'il s'agit de combustibles solides, ces difficultés sont aussi graves que nombreuses. En premier lieu, l'allumage et la mise en train sont loin d'être commodes. Le feu une fois allumé, il faut l'entretenir par l'introduction méthodique de fragments de combustible dans une capacité close. La machine doit marcher d'une manière continue, sans quoi, après chaque arrêt un peu prolongé, le feu s'éteint, et l'on doit recommencer les opérations longues et pénibles de la mise en train. Les fumées chaudes et chargées de suie attaquent et empâtent les organes. L'élimination des cendres et scories n'est pas facile à obtenir. Enfin, dans certains systèmes de machines à air chaud, les espaces nuisibles jouent un rôle capital; or les enveloppes réfractaires dont on entoure le foyer sont poreuses et volumineuses, elles offrent donc des vides considérables, qui peuvent troubler le fonctionnement de la manière la plus grave. Belou avait imaginé une machine à air chaud avec combustion intérieure entretenue par un combustible solide. Malgré son ingéniosité et celle de ses collaborateurs, ses recherches, longues, coûteuses, persévérantes, ont échoué devant ces obstacles.

Le problème a été repris récemment, et, grâce à des combinaisons habiles, on a pu tourner en partie ces difficultés et faire fonctionner pratiquement des moteurs de ce genre.

Lorsque l'on fait usage de combustibles gazeux, une partie de ces difficultés disparaissent. Ainsi, l'admission du combustible est facile à régler; la production de fumée peut être fort atténuée et même disparaître : il n'y a pas à s'occuper des cendres ni des scories.

Mais les combustibles gazeux sont très peu répandus à l'état naturel. Pour faire usage d'un pareil combustible, on est réduit à le préparer de toutes pièces et, par suite, il coûte cher.

Le combustible gazeux le plus usité pour la production de la force motrice est le gaz de l'éclairage. Mais en général le prix en est fort élevé, incomparablement plus élevé, pour une même production de chaleur, que celui de la houille; il devient donc indispensable d'en économiser la consommation. C'est pour cette raison que jusqu'ici les

machines empruntant leur action au gaz de l'éclairage ne s'emploient guère que pour de petite puissance et dans le cas d'un travail intermittent et de peu de durée. La même nécessité a amené, dans les machines à gaz, des perfectionnements considérables, ayant pour résultat de diminuer leur consommation; c'est ainsi, comme on l'a vu, qu'au point de vue de l'utilisation mécanique de la chaleur du combustible, les machines à gaz soutiennent victorieusement la comparaison avec les machines à vapeur les plus perfectionnées.

Le prix du gaz de l'éclairage ordinaire dans les grandes villes comporte, comme éléments principaux, les frais d'amortissement et d'entretien d'une immense canalisation, les dépenses correspondant aux fuites qu'elle occasionne, des frais généraux énormes, etc. Toutes ces dépenses accessoires l'emportent de beaucoup sur les frais de fabrication proprement dits. On a cherché, dans certains cas, à s'en affranchir, en fabriquant directement le gaz dans une petite usine, spécialement consacrée à l'alimentation du moteur thermique et qui joue, à l'égard de ce moteur, le même rôle que la chaudière vis-à-vis de la machine à vapeur. La fabrication peut avoir lieu, soit par distillation simple, soit par combustion incomplète.

Distiller de la houille pour en tirer du gaz est une opération qui, économiquement parlant, est à peu près impraticable sur une petite échelle, à cause de la difficulté de vendre le coke et les sous-produits. La combustion partielle se pratique dans des gazogènes; elle fournit un mélange, à proportions variables, de gaz inertes, d'oxyde de carbone et d'autres gaz combustibles; cette transformation du combustible solide est assez simple et peu coûteuse. Malheureusement les gazogènes actuels présentent des inconvénients qui ont singulièrement limité leur application à la production de la puissance motrice, et sur lesquels nous aurons à revenir.

Toutefois, tout n'est pas dit sur cette question, et l'avenir nous réserve peut-être des surprises; mais, en tout état de cause, il paraît hors de doute que le sort des machines à air chaud est lié aux progrès des appareils ayant pour objet la transformation en gaz des combustibles solides.

Dans un grand nombre d'applications, il y aurait un intérêt de premier ordre à pouvoir se servir des combustibles liquides pour la production de la force motrice; comme encombrement, comme poids, comme facilités d'emmagasinage, ils offrent des avantages considérables; comme commodité d'emploi, ils semblent comparables au gaz de l'éclairage, sauf sur un point : l'allumage et la tenue de la flamme; mais ce point est d'une importance capitale. Pour arriver à produire ou à entretenir la combustion des liquides à l'intérieur de récipients sous pression, divers procédés ont été proposés : les machines à liquides combustibles ont tenté bien des inventeurs et suscité bien des recherches; malgré tout l'intérêt qui s'attache à la question, malgré les efforts qui ont été faits pour la résoudre, ces machines ne se répandent que très lentement dans l'industrie. Espérons que les difficultés que présente leur établissement finiront par être surmontées.

Les machines à combustion intérieure se divisent en deux classes, suivant que la combustion se fait d'une manière régulière et continue, ou qu'elle est explosive et intermittente. Nous entendons ici par *combustion régulière* celle qui se produit lorsque le combustible se consume progressivement et est fourni par débit régulier au fur et à mesure qu'il est brûlé. Dans l'*explosion*, au contraire, le combustible est préalablement mélangé d'une manière intime avec l'air; ce mélange, étant mis en présence d'un corps en ignition, s'enflamme brusquement, et l'inflammation se propage, en un temps très court, dans toute la masse du mélange.

Ces définitions sont loin d'être scientifiques. Malgré des travaux considérables et justement estimés, les phénomènes relatifs à la propagation de la flamme et de l'explosion sont encore mal connus. Il paraît probable que, dans les cylindres des machines à gaz, l'explosion affecte une allure tout autre que dans l'eudiomètre ou les récipients des chimistes; les diagrammes d'indicateur semblent le prouver, quoique peut-être il puisse subsister quelque doute sur l'exactitude des diagrammes obtenus, lorsque les variations de pression sont très rapides. Des recherches nouvelles et précises donnant l'analyse de ces phénomènes obscurs seraient fort à désirer.

Les machines à combustibles solides ne comportent que la combustion continue : les machines à combustibles gazeux ou liquides comportent les deux modes de combustion.

En l'état actuel, les machines à explosion sont de beaucoup les plus en usage. Elles sont alimentées, soit par du gaz d'éclairage, soit par du gaz de gazogène, soit par des combustibles liquides. Quel que soit le mode d'alimentation, le fonctionnement reste à peu près le même. Dans ce qui va suivre, nous aurons principalement en vue les machines à gaz d'éclairage, lesquelles sont les plus répandues.

Au moment de l'explosion, la pression des gaz augmente brusquement; il y a un véritable choc, qui n'est pas sans être préjudiciable aux organes mécaniques. C'est là un des inconvénients des machines à explosion; c'est une des raisons qui font que, pendant longtemps, on a hésité à aborder les grandes puissances à l'aide de ces machines. Comme prix de revient de la force motrice, les machines à gaz d'éclairage ne peuvent soutenir la comparaison avec la machine à vapeur, à cause de la valeur très élevée du combustible consommé. L'usage de ces machines est donc aujourd'hui restreint aux cas où l'économie dans la production du travail peut être sacrifiée à d'autres considérations, considérations de sécurité, de faible encombrement, de prompte mise en marche, etc. Elles s'adaptent bien aux cas où le travail à produire est intermittent et de peu de durée. Dans la plupart des applications néanmoins, le prix de revient de la force motrice a une importance qui ne peut pas être négligée, et c'est avec raison qu'on s'est attaché à augmenter l'effet utile du combustible coûteux brûlé dans les machines à gaz.

Cette question mérite d'être examinée de plus près. Nous n'essayerons pas d'établir,

pour les moteurs dont il s'agit, un décompte numérique de l'emploi de la chaleur; nous nous contenterons d'analyser les déperditions d'une manière sommaire et générale.

Dans une machine à gaz, le coefficient économique, tel que nous l'avons défini plus haut, est fort élevé; si la machine était théoriquement parfaite, elle rendrait, par mètre cube consommé, quelque chose comme 6 à 7 chevaux-heures. En pratique, on est loin de ce chiffre, puisque chaque cheval-heure brûle près d'un mètre cube dans les bonnes machines.

Pour se rendre un compte au moins approximatif des déperditions, on peut les ranger sous les rubriques ci-après :

Pertes par les parois;
Imperfections du cycle;
Résistances passives;
Combustion incomplète et allumage.

Pertes par les parois. — Dans les moteurs en usage, le cylindre est en métal; la combustion intérieure l'échauffe très vite. Il est indispensable de refroidir le cylindre, pour éviter le grippement, qui se produirait inévitablement au contact des garnitures du piston. Ici nous voyons apparaître de nouveau cette question des joints, cet obstacle pratique, qui se dresse à chaque tentative que l'on fait pour améliorer le rendement. La suppression de cet obstacle semble dépendre de la solution de deux problèmes :

1° Découverte d'une matière qui puisse être polie comme le métal, qui en ait l'élasticité et la dureté, et qui supporte mieux que lui les températures élevées;

2° Découverte d'un joint étanche et lubrifiable aux températures élevées.

La perte de chaleur due au refroidissement de la paroi est considérable; dans les meilleures machines existantes, elle s'élève souvent à la moitié de la puissance calorifique du combustible consommé.

On a cherché à l'atténuer par divers procédés. Par exemple, on réserve pour l'allumage une portion de l'enceinte close du cylindre, en dehors de la partie qui reçoit le frottement du piston; le volume ainsi réservé n'est pas ou est peu refroidi, le refroidissement n'agit que sur la paroi frottante.

Le procédé qui jusqu'ici a donné les meilleurs effets consiste à imprimer une grande vitesse au piston, de telle sorte que, pendant la détente des gaz chauds, la durée de leur contact avec les parois refroidissantes soit aussi courte que possible. Ce principe, inauguré il y a près d'un quart de siècle, a été pratiqué avec succès et a conduit aux plus brillants résultats; il semble fort probable qu'avec les méthodes actuelles de construction, l'avenir des machines à explosion soit dans les allures rapides, une fois que l'on aura surmonté certaines difficultés pratiques, notamment celle de l'allumage.

Imperfections du cycle. — Dans l'analyse que nous avons faite de l'emploi de la cha-

leur dans les machines à vapeur, nous avons évalué à 0,60 le coefficient de rendement du cycle, c'est-à-dire le rapport entre le travail indiqué et le travail théorique maximum. Dans les machines à gaz, ce coefficient de 0,60 est bien loin d'être atteint. Les meilleures de ces machines donnent, à l'indicateur, des diagrammes qui n'ont aucun rapport avec le cycle de Carnot; la détente devrait théoriquement refroidir les gaz jusqu'à la température ambiante; or les gaz sortent extrêmement chauds; cette chaleur qu'emportent les gaz à l'échappement est la traduction physique de l'imperfection du cycle. Il y a de grands progrès à réaliser dans cette direction. Peut-être l'usage de régénérateurs, si l'on arrive à les construire dans de bonnes conditions, pourra-t-il procurer des améliorations importantes.

Résistances passives. — A conditions égales, le cylindre d'une machine à gaz est beaucoup plus volumineux que celui d'une machine à vapeur; souvent aussi la machine est à simple effet, en vue d'un refroidissement plus efficace, et elle comporte une compression préalable de l'air. Il ne faut donc pas s'étonner si les frottements et résistances accessoires prennent une importance considérable. Si l'on compare le travail indiqué au travail recueilli sur l'arbre de couche, on arrive à un rendement organique assez faible. Les machines à gaz exigent un graissage très abondant et très soigné, sinon les frottements absorbent la majeure partie du travail des pressions.

Allumage et combustion imparfaite. — La combustion, dans les bonnes machines à gaz, semble en général assez complète, le mélange préalable des éléments gazeux favorisant l'accomplissement des réactions. Les gaz de l'échappement exhalent souvent une odeur très forte, mais cela ne prouve pas que les parties combustibles soient en grande abondance, eu égard à la grande puissance odoriférante de quantités même minimes d'acroléine, d'acétylène ou autres produits analogues. Il serait cependant à désirer que l'on fût mieux fixé sur ce point, qui n'a pas encore fait l'objet d'expériences nombreuses et précises.

Dans beaucoup de cas, notamment lorsqu'il s'agit de petites forces, la quantité de combustible dépensée pour assurer l'allumage, soit directement, sous forme d'une flamme, soit indirectement, sous forme d'une étincelle électrique, est loin d'être négligeable.

Les quatre causes principales de perte que nous venons d'analyser expliquent suffisamment les résultats pratiques auxquels on arrive; le rendement thermique des moteurs à explosion tombe presque au niveau de celui des bonnes machines à vapeur, quoique le coefficient économique soit environ trois fois plus grand. D'un système de moteur à un autre, le résultat final est assez variable; mais les coefficients individuels qui caractérisent les différentes déperditions varient dans des limites encore plus étendues. Il serait donc hors de propos de chercher à les évaluer en chiffres, même d'une manière approximative. Toutefois on peut dire que, dans la plupart des cas, les deux

déperditions prépondérantes sont dues à l'influence des parois et à l'imperfection du cycle.

Nous arrivons à l'examen rapide de quelques-uns des détails les plus importants nécessaires au fonctionnement des moteurs à explosion. Commençons par l'allumage. La combustion étant très rapide, la flamme s'éteint après l'explosion; il faut donc opérer un nouvel allumage à chacun des cycles d'opération. Dans les moteurs en usage, le rallumage s'obtient par des procédés fort divers et qui donnent presque tous des effets réguliers. Voici quelques-uns des plus répandus :

Par un jet de flamme. — Dans les moteurs sans compression préalable, le jet de flamme pénètre directement dans le mélange détonant par l'ouverture d'une petite soupape, qui se referme d'elle-même, dès que la pression intérieure devient prépondérante, par le fait même de l'explosion; dans les moteurs à compression préalable, l'application de ce procédé d'allumage exige quelques dispositifs assez compliqués.

Par déplacement d'une flamme. — Un jet de gaz, allumé par une flamme fixe, est renfermé dans une cavité mobile, qui, par un léger et rapide déplacement, est mise en communication avec le mélange explosif; l'allumage ainsi obtenu est fort régulier, lorsque la machine est bien établie et convenablement réglée.

Par l'étincelle électrique. — L'étincelle jaillit entre deux pointes métalliques isolées; le courant à haute tension est fourni, soit par une bobine d'induction, soit par une petite dynamo actionnée par le moteur, soit enfin par un appareil assez analogue comme principe au coup de poing de Bréguet, et dans lequel une bobine induite passe rapidement entre les pôles d'un aimant, sous l'action d'un fort ressort, déclenché au moment voulu par le mouvement du moteur; avec ce dernier dispositif, l'intensité de l'étincelle est indépendante de l'allure de la machine, et le travail absorbé par l'allumage est assez petit. L'allumage électrique nécessite quelques précautions d'installation et d'entretien, en vue d'éviter les dérivations du courant.

Par incandescence. — Un corps rendu incandescent, soit par le passage d'un courant électrique, soit par une flamme, est mis, au moment voulu, en contact avec le mélange explosif.

Dans tous ces procédés, l'allumage, provoqué en un point, s'étend, par propagation, à tout le mélange. On semble avoir trouvé avantage à faire varier le dosage, de telle sorte que la partie du mélange qui avoisine le point d'allumage soit plus riche que le reste en éléments combustibles.

Il est un procédé d'allumage qui, pour n'avoir pas été appliqué d'une manière tout à fait pratique, ne semble pas absolument inapplicable : il consiste à exercer sur le

mélange explosif une compression, qui l'échauffe et détermine la réaction; si le mélange est déjà chaud et contenu dans une capacité chaude, il suffit d'une compression assez modérée pour le porter à la température d'inflammation; avec ce procédé, la combustion se produirait presque instantanément dans toute la masse comprimée.

Il faut, pour refroidir les parois, une assez grande quantité d'eau, qui souvent coûte cher ou est difficile à se procurer; il serait fort avantageux, dans beaucoup de cas, de pouvoir échapper à cette sujétion. On y est parvenu, dans les petits moteurs, en augmentant l'action du rayonnement et de l'air extérieur, au moyen de nervures à grande surface. Pour les moteurs un peu puissants, le résultat ainsi obtenu serait insuffisant. On a essayé aussi d'immerger le cylindre dans une bâche ouverte et pleine d'eau; cette eau se vaporise à 100 degrés au fur et à mesure que la chaleur lui est transmise; la consommation d'eau se trouve ainsi fortement réduite.

Sur l'arbre de couche est monté un volant, destiné à amortir les variations périodiques du travail moteur. Ces variations, dans la plupart des moteurs à explosion, sont beaucoup plus étendues que dans les machines à vapeur, ce qui entraîne à donner au volant une grande puissance. Pour réprimer les écarts permanents de régime, résultant des variations du travail résistant, on a généralement recours au régulateur à force centrifuge. Le régulateur fonctionne de diverses manières.

Parfois il agit par étranglement, en créant, sur le passage des courants gazeux, des pertes de charge variables. Ce mode d'action, très usité dans les machines à vapeur, est beaucoup plus limité dans ses résultats lorsqu'il s'applique à des machines à explosion.

Dans un grand nombre de machines à gaz, le régulateur agit sur l'admission du gaz combustible. Il est délicat de modifier la teneur du mélange explosif, dont la composition doit être maintenue entre des limites resserrées, au delà desquelles l'allumage ne se ferait plus. Ce moyen a cependant été appliqué dans certaines machines et a pu réussir, grâce à des artifices ingénieux. Le plus souvent on procède autrement. La puissance de la machine est réglée de manière à l'emporter, en marche normale, sur le travail résistant; la vitesse tend donc constamment à s'accroître. Dès qu'elle dépasse la limite fixée, le régulateur déplace une came, et l'admission se trouve supprimée pendant un ou plusieurs cycles. La machine continue son mouvement en vertu de la force vive accumulée dans le volant. Quand la vitesse a suffisamment diminué, le régulateur reprend sa position ordinaire, et l'admission du gaz se rétablit.

L'action du régulateur à force centrifuge résulte de la force d'inertie des boules, force variable avec la vitesse. Dans quelques machines récentes, on a eu l'idée ingénieuse d'utiliser sous une autre forme la variation de la force d'inertie : la pièce mobile est oscillante et non pas tournante; les régulateurs ainsi agencés sont parfois d'une grande simplicité.

Grâce à ces procédés et à l'aide d'un volant puissant, on peut maintenir une allure à peu près régulière. Les organes d'admission du gaz étant petits, tout le système régulateur peut être établi légèrement et tient peu de place. La dépense du gaz augmente et diminue en même temps que le travail à fournir.

Dans quelques machines de faible puissance et qui n'ont pas besoin d'une grande uniformité de vitesse, le régulateur est supprimé; pour empêcher la machine de s'emporter, il suffit d'étrangler l'arrivée du gaz; quand la vitesse dépasse sa valeur normale, le mélange explosif devient trop pauvre et ne s'enflamme plus.

Dans certaines machines, les gaz, avant l'explosion, sont à la pression ambiante, et la pression motrice est due à l'élévation de température produite par l'explosion. D'autres machines procèdent d'un fonctionnement différent : le mélange explosif est comprimé avant d'être allumé.

Les machines sans compression préalable sont plus simples d'organes; l'allumage se fait sans difficulté.

La compression préalable présente des avantages nombreux; la puissance est plus grande à égalité de volume et la chaleur, en général, mieux utilisée. De plus, au moment de l'explosion, les organes de transmission sont déjà comprimés, ce qui atténue les temps perdus et l'effet des chocs. La compression est effectuée, tantôt par un piston spécial, tantôt dans le cylindre moteur lui-même. Ce dernier procédé est le plus en usage; il est caractérisé sous le nom de *cycle à quatre temps,* ce cycle se composant de quatre opérations successives, exécutées dans le même cylindre, à savoir :

Aspiration du mélange explosif;

Compression du mélange explosif;

Explosion et détente;

Expulsion des produits brûlés.

Le cycle à quatre temps présente cet avantage important, que le mélange se trouve réchauffé, d'un côté, par son contact avec les parois du cylindre, contact prolongé pendant deux courses du piston, d'un autre côté par le fait même de la compression; il est donc dans de bonnes conditions pour s'enflammer, et, de fait, le cycle à quatre temps permet des dosages relativement faibles en gaz combustible. Sur les quatre opérations, une seule, l'explosion suivie de la détente, donne lieu à un travail moteur; deux opérations, l'aspiration et l'expulsion, n'occasionnent qu'une faible dépense de travail; la compression absorbe du travail. De plus, dans la plupart de ces machines, les pressions ne s'exercent que sur l'une des faces du piston; l'autre face reste en contact avec l'air extérieur, qui concourt efficacement au refroidissement. En définitive, le mécanisme est assez mal utilisé; là où une machine à vapeur donnerait quatre coups de piston utiles, la machine en question n'en donne qu'un, dont le travail est en partie absorbé par la période de compression.

Au point de vue de la régularité d'allure, ce système laisse aussi fort à désirer, le

volant devant dépenser en deux tours le travail emmagasiné pendant une demi-révolution. On pallie ces deux inconvénients, en imprimant à la machine une grande vitesse de marche, vitesse qui cadre très bien, d'ailleurs, avec la réalisation de rendements élevés. Lorsque, en outre, on cherche à obtenir une vitesse de rotation bien régulière, on attelle deux pistons sur un même arbre de couche, en croisant les périodes, de manière à avoir une impulsion à chaque révolution. Au besoin, quatre pistons attelés sur le même arbre donnent une régularité analogue à celle des machines à vapeur à double effet.

Le cycle à quatre temps a permis d'établir des machines à gaz solides et durables, d'un fonctionnement régulier, faciles à conduire et à entretenir, ayant un rendement thermique relativement élevé. Malgré le haut prix du combustible qu'elles consomment, elles ont été appliquées à de nombreuses industries et ont pris une extension rapide. Il est bon de rappeler ici que le cycle à quatre temps a été inventé par Beau de Rochas et décrit par lui, de la manière la plus précise, dans son brevet en date du 16 janvier 1862.

Nous mentionnerons encore quelques problèmes qui se sont posés dans la pratique des moteurs à air chaud.

En premier lieu vient la question du graissage; elle est ici particulièrement importante et délicate; à cause de la valeur élevée des résistances dues aux frottements, et des difficultés qu'occasionne l'emploi des fluides à température élevée.

La mise en train, qui, abstraction faite de la montée en pression de la chaudière, est si facile dans les machines à vapeur, ne laisse pas ici que de donner lieu à des embarras, surtout pour les moteurs à compression préalable. Il en est de même du changement de marche. Ces problèmes ont été plus ou moins résolus par divers procédés, sur lesquels il est inutile d'insister.

Bien d'autres questions se présentent encore, telles que celle des mélangeurs de gaz, celle de l'expulsion totale ou partielle des produits de la combustion, celle des agencements mécaniques des moteurs, etc. Quelques-unes de ces questions seront examinées ci-après, à propos de l'étude que nous aurons à faire des machines de l'Exposition.

Indiquons, pour terminer, les circonstances dans lesquelles l'usage des moteurs à air chaud peut être considéré comme avantageux.

Lorsqu'il s'agit de produire à bon marché une force motrice puissante et continue, la machine à vapeur ordinaire reste encore le moteur industriel par excellence; les autres machines thermiques n'ont reçu, dans de pareilles conditions, que des applications isolées et justifiées par des conditions économiques spéciales; pour que la situation fût modifiée, il faudrait sans doute que de grandes améliorations fussent apportées dans la construction de ces moteurs; ceux qui consomment des combustibles

solides, soit directement, soit après gazéification, se prêtent peut-être mieux que d'autres à de pareilles applications.

Pour les puissances de quelques chevaux, les machines thermiques, et surtout les machines à explosion, ont pris une large place dans l'industrie; leurs avantages sont surtout manifestes lorsque le service à faire est intermittent. C'est principalement la machine à gaz avec cycle à quatre temps qui a donné lieu à des applications importantes.

Pour les très petites forces, lorsque la question de commodité d'emploi est prédominante, la machine à vapeur cesse d'être à sa place, et les divers moteurs thermiques rendent des services chaque jour plus appréciés.

Les machines thermiques, telles qu'on les construit aujourd'hui, sont encore trop lourdes, trop encombrantes et trop délicates pour avoir donné lieu à des applications importantes dans le cas d'installations mobiles; quelques essais de ces machines ont été tentés pour la traction des tramways et pour la propulsion d'embarcations légères.

Des considérations qui précèdent, ainsi que de l'étude des machines exposées au Champ de Mars, il se dégage des impressions qu'il ne semble pas inutile de résumer. Dans toute machine thermique, la transformation de la chaleur en travail utile comporte trois opérations successives :

Dégagement de la chaleur contenue dans le combustible;

Incorporation de cette chaleur dans l'agent moteur;

Transformation de la chaleur en travail.

Dans les moteurs à explosion modernes, la première et la deuxième de ces opérations se font dans des conditions satisfaisantes et d'une manière bien plus complète que dans les machines à vapeur; ce sont là des résultats que l'on peut dès maintenant considérer comme acquis. La troisième opération, au contraire, laisse beaucoup à désirer : les déperditions par les parois sont fort importantes et la détente est loin de refroidir le gaz jusqu'à une température voisine de la température ambiante; mais ce sont là des obstacles qui ne paraissent rien moins qu'insurmontables. Quels seront les moyens qui permettront de tourner ces difficultés? Sans qu'il soit nécessaire de transformer radicalement les méthodes de construction actuelles, on peut prévoir l'emploi de plus grandes vitesses et de compressions plus élevées. D'autre part, la découverte de nouveaux matériaux à la fois réfractaires, résistants, compacts et peu conducteurs, celle de corps lubrifiants conservant leurs propriétés aux températures élevées, changeraient beaucoup la face de la question. Avec de pareilles ressources, la combustion intérieure continue et l'usage des régénérateurs ne sembleraient plus impossibles.

Il ne semble donc pas téméraire d'espérer que l'utilisation de la chaleur dans les machines motrices puisse devenir beaucoup plus complète qu'aujourd'hui, et qu'au lieu d'un rendement de 8 à 10 p. 100, comme dans les meilleures machines à vapeur,

IMPRIMERIE NATIONALE.

de 15 ou 20 p. 100, comme dans les meilleurs moteurs à gaz modernes, on pourra atteindre des chiffres notablement plus élevés.

La machine à vapeur ordinaire est et demeure aujourd'hui le moteur industriel par excellence. Mieux que toute autre, cette machine réunit les conditions de solidité, d'économie, de facile conduite, de légèreté, d'élasticité, de souplesse, qui lui assurent, pour longtemps peut-être, la première place dans l'industrie. Cette machine est arrivée à un très grand état de perfection; au point de vue du rendement dynamique de la chaleur qu'elle consomme, elle approche beaucoup de la limite, et les progrès qui lui restent à réaliser ne sauraient être bien importants.

La machine à air chaud, au contraire, n'en est qu'à ses premiers jours. Son cycle est fort défectueux; néanmoins, dans son état actuel, pour un même travail, elle dépense moins de chaleur que sa rivale. Elle se prête mieux à un service intermittent. Elle ne présente pas les mêmes dangers d'explosion. D'autre part, elle est moins simple, d'un entretien plus délicat, elle exige du combustible cher, elle est lourde, elle manque d'élasticité, elle ne saurait s'accommoder à la même variété d'usages que la machine à vapeur. Mais ces défauts, tout grands qu'ils peuvent être, sont de ceux dont la pratique finira par avoir raison. Il reste beaucoup à faire; le champ est à peine défriché. Si la machine à vapeur a un passé magnifique, la machine à air chaud a peut-être devant elle un avenir immense.

Nous allons passer à la description de quelques-uns des appareils qui figuraient à l'Exposition; nous les diviserons en cinq catégories :

Machines à combustible solide;

Machines à gaz d'éclairage avec explosion sans compression;

Machines à gaz d'éclairage à explosion avec compression préalable;

Machines à combustibles divers;

Appareils divers.

Machines à combustible solide. — La houille, le coke, les combustibles solides en général, sont, par le fait de leur bas prix, les véritables combustibles industriels. C'est du côté de leur utilisation directe que se sont tournés la plupart des inventeurs qui ont cherché à se servir de l'air comme véhicule pour transformer la chaleur en puissance mécanique.

Malheureusement, en même temps que de la chaleur, les combustibles solides donnent, en brûlant, des cendres et de la suie, qui en rendent l'emploi fort gênant; c'est pourquoi les premiers inventeurs qui se sont occupés de la question ont jugé indispensable d'opérer une séparation, une sorte de filtration de la chaleur, en la transmettant au fluide par l'intermédiaire d'une paroi métallique. Les anciennes machines à air chaud sont presque toutes à chauffage extérieur. Ce mode de chauffage, comme on l'a vu plus haut, ne permet pas de communiquer à l'air une température élevée;

par suite, le coefficient économique reste faible. Dans le but d'améliorer le rendement, qui eût été absolument insuffisant, on a eu fréquemment recours à l'artifice des *régénérateurs de chaleur*. Proposés dès 1816 par Robert Stirling, les régénérateurs ont été remis en honneur en 1851 par John Ericson, qui les appliqua à de grandes machines à air chaud, chauffées par l'extérieur.

En principe, un régénérateur est un massif poreux, traversé par un courant gazeux, auquel il présente une très grande surface de contact sous un volume réduit; il est interposé entre deux capacités à températures différentes; l'air le traverse alternativement dans deux sens opposés; lorsque le courant gazeux a lieu du récipient chaud vers le froid, l'air se dépouille de sa chaleur au contact des surfaces multipliées qu'il vient lécher, et sort froid de l'appareil; lorsque, au contraire, le courant est dirigé du froid vers le chaud, l'air reprend la chaleur déposée dans les mailles du régénérateur, et arrive déjà échauffé dans le récipient à haute température.

La théorie démontre qu'avec un régénérateur suffisamment efficace, le rendement dynamique de la chaleur dépensée peut se rapprocher indéfiniment du coefficient économique, c'est-à-dire que le cycle des opérations que parcourt le fluide moteur est aussi parfait que le cycle de Carnot. Mais le régénérateur présente cet avantage considérable, qu'il n'exige plus, comme le cycle de Carnot, des cylindres de dimensions formidables ou de pressions excessives; il s'accommode fort bien des dimensions et des pressions usitées ordinairement en mécanique. Ericson avait constitué ses régénérateurs à l'aide de toiles métalliques superposées en forme de paquets; mais ces toiles amenaient des pertes de pressions considérables et, de plus, elles s'altéraient rapidement. D'autres inventeurs ont modifié plus ou moins les dispositions de la machine d'Ericson, et se sont heurtés aux mêmes obstacles. En somme, les régénérateurs sont à peu près abandonnés aujourd'hui dans la construction des machines thermiques; le principe n'est plus guère appliqué que dans les opérations nécessitant, soit l'obtention de températures très élevées, soit une extrême économie dans l'emploi de la chaleur. Pour ces objets, ils se construisent sur une immense échelle et rendent les plus éminents services. Ericson lui-même ne tarda pas à laisser de côté l'usage des régénérateurs, et il s'appliqua à la construction de petites machines à air chaud, dans lesquelles l'effet utile du combustible était tout à fait sacrifié.

A l'Exposition de 1878, on voyait figurer quelques machines à chauffage extérieur : celle de Rider avec régénérateur, celle de Laubereau sans régénérateur. En 1889, nous ne voyons apparaître que les machines où l'air est chauffé par son contact direct avec le combustible.

Théoriquement, le chauffage direct est de beaucoup supérieur au chauffage par l'extérieur; mais, en pratique, il se heurte à des difficultés qui, pendant fort longtemps, en ont retardé la réussite.

Il suffit de rappeler les tentatives si persévérantes et si malheureuses de Belou. C'est que la manœuvre et la conservation des organes mécaniques, dans une atmosphère de

gaz chauds et mélangés de cendres, d'escarbilles, de produits mal brûlés, sont fort difficiles à réaliser. Jamais, que nous sachions, on n'a même essayé d'appliquer les régénérateurs à des machines alimentées par du combustible solide avec chauffage intérieur. Il va de soi que les combustibles solides ne comportent pas de dispositifs à explosion; la combustion étant lente, la compression préalable est à peu près indispensable.

En 1878, on voyait dans le Palais des Machines quelques moteurs rentrant dans la catégorie que nous étudions : celui de Hock et celui de Brown; tous deux étaient chauffés intérieurement et brûlaient du coke.

A l'Exposition de 1889, le moteur Brown a fait de nouveau son apparition; il est présenté par M. Jules Le Blanc, constructeur à Paris. Cet appareil ne diffère que par des détails de l'ancienne machine à air chaud de Belou, mais, en pareille matière, les

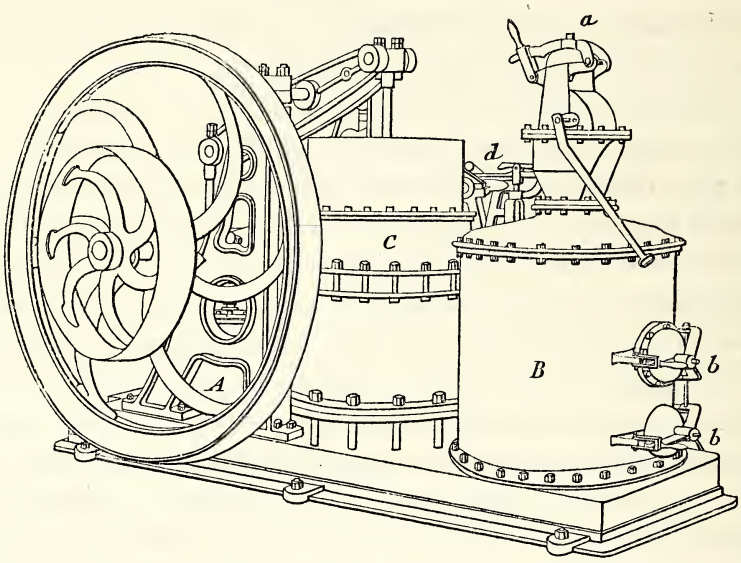


Fig. 164. — Moteur à air chaud, système Brown, construit par M. Le Blanc.

détails ont une grande importance. La figure 164 représente une vue extérieure de cette machine :

A. Pompe puisant l'air dans l'atmosphère.
B. Foyer sous pression : c'est une enveloppe métallique munie intérieurement d'une grille et d'une garniture réfractaire.
C. Cylindre moteur, à simple effet et à piston plongeur.
a. Trémie à sas pour le chargement du coke.
b, *b.* Regard et porte de décrassage du foyer.
d. Distributeur à came et soupapes.

Le système se comprend de lui-même : l'air, comprimé à une pression effective de 1 kilogramme et demi à 1 kilogramme deux tiers par centimètre carré au-dessus de la

pression atmosphérique, est envoyé sous la grille, où il produit la combustion; les produits gazeux et chauds s'emmagasinent dans la vaste capacité du foyer, où ils ont le temps de se décanter; de là ils sont envoyés dans le cylindre moteur par la distribution.

M. Le Blanc a produit les résultats fournis par un certain nombre d'essais de rendement, pratiqués sur un moteur ayant les proportions ci-après :

DÉSIGNATION.	CYLINDRE MOTEUR.	POMPE À AIR.
Diamètre..... (mill.).	410	307
Course du piston..... (mill.).	414	462
Surface du piston..... (cent. carrés).	1,320	735
Volume engendré par course..... (litres).	546.5	339.6

Voici, à titre d'exemples, les diagrammes relevés dans une de ces expériences, sur le piston moteur et sur le piston soufflant (fig. 165):

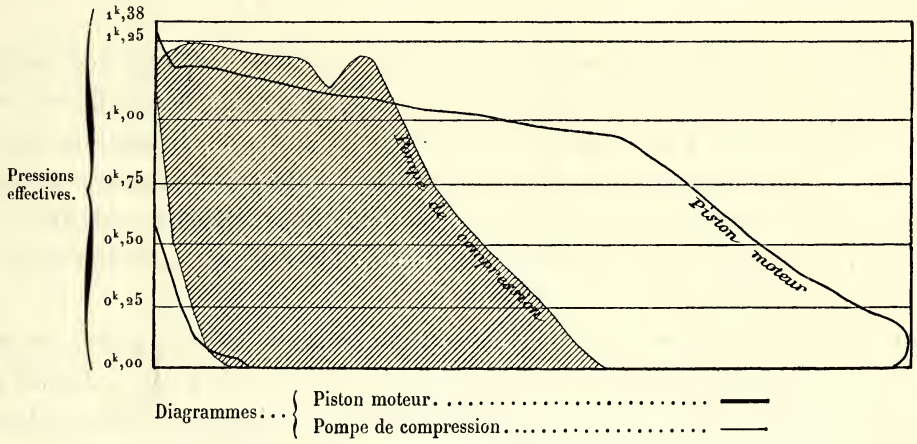


Fig. 165. — Diagrammes de la machine Brown.

Les résultats de cette expérience sont rapportés ci-après :

DÉSIGNATION.	CYLINDRE MOTEUR.	POMPE DE COMPRESSION.
Pression moyenne par centimètre carré..... (kilogr.).	0.877	0.750
Travail indiqué par révolution..... (kilogr.-m.).	480	255
Travail indiqué utile..... (kilogr.-m.).	225	
Nombre de tours par minute.....	86	
Puissance indiquée..... (chev.-vap.).	4.30	
Puissance au frein..... (chev.-vap.).	3.45	
Rendement organique.....	0.78	
Température moyenne à l'échappement..... (degrés).	261	

Le combustible est du coke. Le chargement se fait au moyen de la trémie surmontant le foyer, laquelle est munie de deux portes et d'un robinet d'équilibre, et fonctionne comme une écluse à sas.

Deux portes à charnière permettent de nettoyer le foyer et le cendrier.

Le régulateur agit sur une valve, qui étrangle plus ou moins le courant d'air comprimé; quand la vitesse dépasse celle de régime, et que, par suite, le courant est étranglé, l'excédent de l'air comprimé par la pompe est renvoyé dans l'atmosphère par une soupape de sûreté.

Dans quelques installations, cet excès d'air passe dans un grand réservoir, où il s'emmagasine et sert de réserve, soit pour le cas où la vitesse tend à baisser, soit pour la mise en marche.

La machine Brown a été installée en Angleterre dans un certain nombre de phares isolés, pour le service des sirènes. Ainsi qu'on l'a vu par la description qui précède, elle n'a pas besoin d'eau pour fonctionner, ce qui, pour certaines applications, est un avantage précieux.

La Compagnie française des moteurs à air chaud, de Paris, exposait une machine imaginée par M. Bénier et fondée sur les mêmes principes que la machine Brown, mais qui en diffère par un point important, c'est qu'il n'y a pas de distribution entre le foyer et le cylindre moteur; ce dernier sert lui-même de foyer; il en résulte ce grand avantage, que la distribution est baignée par un fluide froid; à chaque pulsation, l'air refoulé par la pompe vient s'échauffer au contact du foyer et agit immédiatement sur le piston moteur.

Pour peu qu'on examine la question, on voit que, dans un système pareil, les mouvements des pistons doivent être nécessairement discordants, sans quoi le travail produit deviendrait très faible et l'utilisation de la chaleur fort mauvaise; il faut également que les espaces nuisibles soient aussi réduits que possible.

La figure 166 représente la machine Bénier :

A. Foyer entouré d'une enveloppe réfractaire.
B. Cylindre moteur.
C. Pompe à air.
D, *D.* Balancier, actionné par le piston moteur.
E, *E.* Arbre de couche et volant.
F. Manivelle recevant son mouvement du balancier et le transmettant au piston *C* de la pompe à air; on voit que le mouvement des deux pistons est discordant : l'un est à l'extrémité de sa course lorsque l'autre est à la moitié de la sienne.

Le cycle comporte quatre périodes: aspiration, compression, combustion et détente, échappement. Les trois premières périodes sont réglées par un tiroir unique; l'échappement est produit par une soupape.

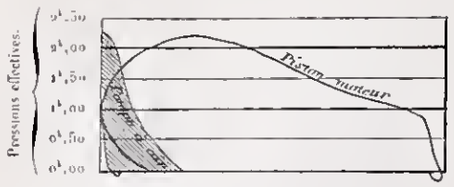
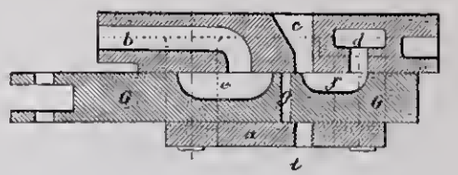
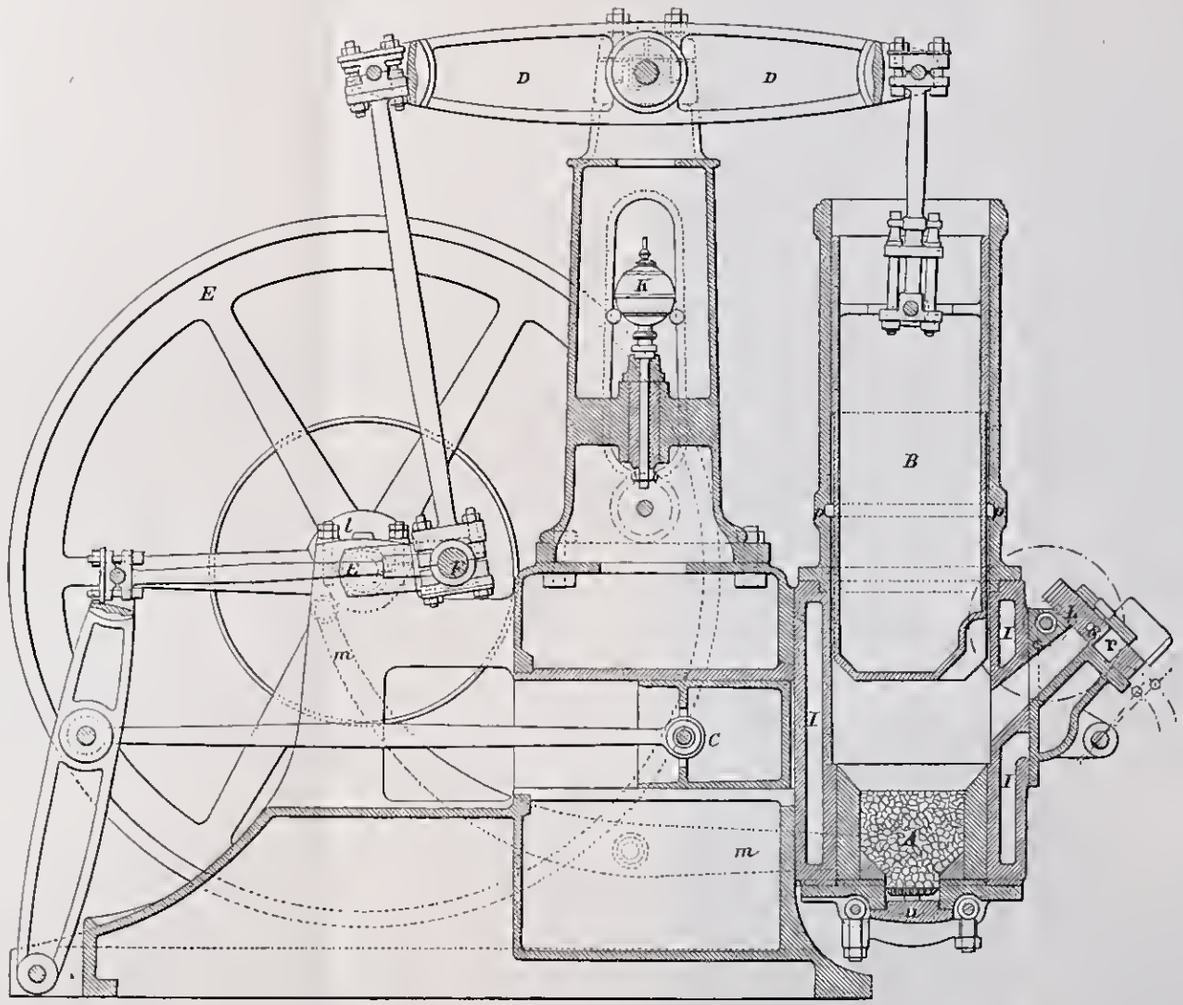


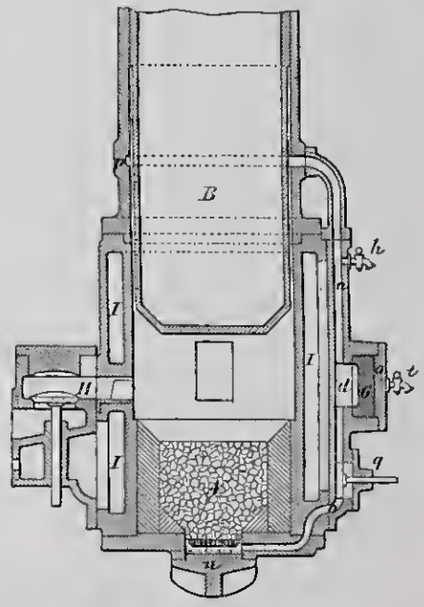
Diagramme des pressions.



Détail du tiroir.



Coupe longitudinale.



Coupe transversale du cylindre.

Fig. 166. — Machine à air chaud, système Bénier.

C. F. C

G. Tiroir de distribution.
a. Contre-plaque, appliquant le tiroir *G* sur sa glace.
b. Conduite d'aspiration de l'air frais; elle puise l'air dans le bas de la machine, lequel communique librement avec l'atmosphère.
c. Conduite de communication avec la pompe à air.
d. Conduite de communication avec le cylindre moteur.
e. Premier creux du tiroir, mettant, au moment voulu, la pompe à air, en *c*, en communication avec l'air extérieur par *b*.
f. Deuxième creux du tiroir, faisant communiquer, au moment voulu, les deux cylindres par *c* et *d*.
g. Orifice d'échappement pour l'arrêt de la machine.
h. Robinet que l'on ouvre pour stopper.
H. Soupape d'échappement.
l. Came de commande de la soupape d'échappement.
I. Circulation d'eau, pour le refroidissement du cylindre-foyer.
K. Régulateur centrifuge.

Expliquons le jeu de la machine. L'air frais aspiré est ensuite comprimé jusqu'à mi-course du piston de la pompe; à ce moment, le piston moteur étant au bas de sa course, la communication s'ouvre entre les deux cylindres; l'air s'échauffe au contact du foyer et soulève le piston moteur, pendant que le piston soufflant achève son excursion; puis la communication est fermée et l'air agit par détente pendant la moitié de la course du piston moteur.

La machine Bénier se distingue par deux dispositifs fort ingénieux : les précautions prises contre le grippement du piston moteur et le mode de chargement du foyer. Le piston moteur a, comme on le voit sur la figure, la forme d'un plongeur; c'est la partie supérieure seule qui fait joint; elle ne comporte pas de garniture; elle est simplement tournée très juste au diamètre d'alésage du cylindre, de manière à frotter doux; c'est la grande longueur de la partie frottante et le graissage qui assurent l'étanchéité; le bas du plongeur, au contraire, laisse sur tout son pourtour un jeu de quelques millimètres. La lumière d'admission *d* se bifurque en *n* et *o* :

n. Lumière aboutissant vers le haut du foyer.
p. Canal annulaire formant épanouissement de la lumière *n*.

Il résulte de cette disposition que l'air froid et comprimé admis dans le cylindre moteur se divise en deux courants : l'un des courants pénètre au-dessous du foyer, pour activer la combustion, l'autre se répand autour de la partie supérieure du plongeur, la rafraîchit et empêche le contact du gaz brûlé et chargé de poussière. Le régulateur agit sur la valve *q*, qui modifie la proportion entre les deux courants.

La machine marche au coke, concassé à une grosseur à peu près uniforme; le distributeur de chargement représenté en *L* est un tiroir, glissant entre une plaque et une contre-plaque, et qui reçoit de la machine un mouvement alternatif lent; il porte

en son milieu une lumière *r*, dans laquelle un enfant dépose un à un les morceaux de coke; par suite du mouvement du tiroir, cette lumière est mise successivement en relation avec l'extérieur pour recevoir son chargement, et avec le foyer, où elle verse le coke qu'elle contient.

Un regard *s*, fermé par une plaque de verre, permet, à chaque oscillation, de se rendre compte de l'état du foyer. Dans quelques installations, le chargement est rendu automatique à l'aide d'une petite noria qui fait fonction de chargeur, et que la machine met en mouvement par l'intermédiaire d'une courroie.

Signalons encore le robinet de mise en marche *t*, qu'il suffit d'ouvrir pour réduire la compression, ainsi que la porte de nettoyage *u*, s'ouvrant au-dessus d'une fosse pour enlever les cendres.

La marche de cette machine est fort régulière, l'entretien facile. Les constructeurs annoncent une consommation d'environ 1 kilogr. 30 de coke par heure et par cheval effectif.

Machines à explosion sans compression. — Dans les machines à gaz sans compression, le mélange détonant, avant l'inflammation, se trouve sensiblement à la pression atmosphérique; le diagramme théorique du fonctionnement peut être représenté de la manière suivante (fig. 167) :

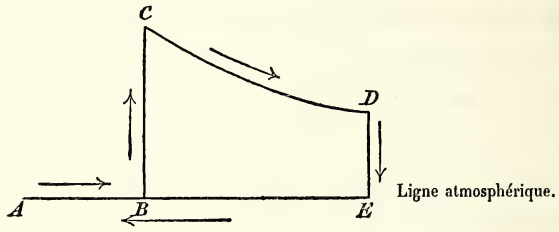


Fig. 167. — Diagramme théorique du fonctionnement des machines à explosion sans compression.

Le piston étant en *A* à fond de course, de *A* en *B* a lieu l'aspiration du mélange détonant;

En *B*, déflagration, laquelle fait subitement monter la pression suivant la verticale *BC*;

Le piston continuant à s'avancer, le point figuratif décrit la courbe de détente *CD*;

En *D*, échappement faisant retomber la pression; le point figuratif décrit la verticale *DE*;

De *E* en *A*, retour en arrière du piston, chassant devant lui les produits de la combustion.

La pression en *C*, au moment de l'inflammation, est d'environ 3 kil. 500 à 4 kilogrammes par cm^q effectif. Le coefficient de détente, c'est-à-dire le rapport $\frac{EA}{BA}$ des

volumes à l'échappement et à l'admission, ne dépasse guère 3; dans ces conditions, le refroidissement produit par la détente est toujours faible, c'est-à-dire que les gaz s'échappent à une haute température et l'utilisation dynamique de la chaleur est médiocre.

Mais, d'un autre côté, ces machines sont simples, faciles à conduire, à entretenir et à mettre en train; dans les cas où l'on n'a besoin que d'une faible puissance, travaillant par intermittence, elles peuvent rendre de fort bons services.

On en rencontrait un certain nombre d'exemplaires à l'Exposition; nous allons en décrire quelques-uns :

La machine à gaz de M. Fernand Forest, de Paris, est bien connue dans l'industrie. Elle se distingue par quelques particularités intéressantes (fig. 168).

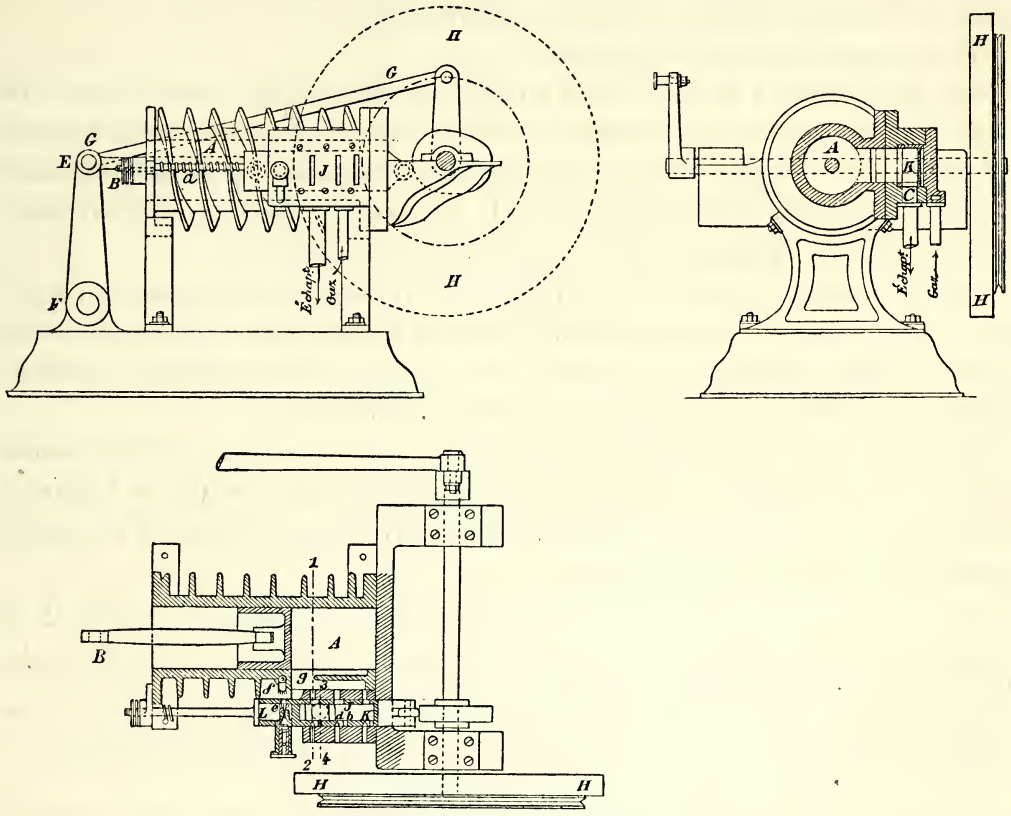


Fig. 168. — Moteur Forest.

Le cylindre *A*, horizontal, est garni de nervures en hélice, qui suffisent pour limiter l'élévation de température dans ces machines, lesquelles ne se construisent que pour de faibles puissances. La bielle *B*, articulée directement sur le piston, agit sur un balancier *EF*, pivotant sur l'axe *F*, et qui, par l'intermédiaire d'une bielle en retour *GG*, actionne la manivelle de l'arbre du volant *HH*. L'ensemble, comme on le voit, est à

la fois compact et léger; l'arbre de couche, très voisin du fond du cylindre, commande directement le tiroir de distribution *J*, à l'aide d'une came calée sur l'arbre et d'un galet; le ressort *a* rappelle constamment le tiroir vers la droite, en appuyant le galet sur la came de commande.

Le tiroir est creux et comporte deux cavités distinctes : la première *K* est la chambre de mélange, la deuxième *L* est la chambre d'allumage. Les parois latérales de la chambre *K* sont percées d'ouvertures *b*, *b*, *b*, qui correspondent en temps utile avec des ouvertures analogues pratiquées dans la glace et dans la contre-plaque; la lumière *C*, percée dans le dessous du tiroir, sert à l'échappement; les petits canaux *d*, *d* amènent le gaz qui pénètre dans la chambre de mélange par un grand nombre de petits trous.

La chambre d'allumage *L* reçoit le gaz par un bec intermittent *e*; ce dernier se rallume, à chaque révolution, à un brûleur permanent *f*.

Voici comment fonctionne le système :

Les pistons étant à fond de course à droite, les lumières de la contre-plaque, du tiroir et de la glace se correspondent, en même temps que les petits canaux sont mis en relation avec la prise de gaz; sous l'aspiration du piston, le mélange détonant pénètre dans la chambre de mélange et, de là, dans le cylindre. Le brûleur intermittent *e* s'allume au brûleur fixe *f*.

Quand le piston a dépassé le tiers de sa course, le tiroir est brusquement rappelé vers sa droite, toutes les ouvertures sont fermées en même temps; ce même mouvement met la chambre d'allumage en relation avec le cylindre; l'inflammation se produit, facilitée par le déflecteur *g* qui ramène le mélange à l'allumeur.

Le piston achève son excursion vers la gauche; à ce moment, le tiroir est ramené légèrement vers la droite, de manière à démasquer à la fois les orifices de la glace et d'échappement; il conserve cette position, et l'expulsion des produits brûlés se continue pendant la course rétrogade du piston.

Ce moteur se construit pour des forces variant de $\frac{1}{10}$ de cheval à 1 cheval. Il est parfois muni d'un régulateur agissant par étranglement sur l'admission d'air. Il marche régulièrement, tient peu de place et n'a pas besoin d'eau de refroidissement. La consommation annoncée est de 1,500 litres par cheval-heure pour les grands modèles.

Le moteur Bénier, construit par la Compagnie parisienne d'éclairage par l'électricité, ne diffère guère du précédent que par la disposition relative des divers organes (fig. 169). Le cylindre *A* est vertical; il agit sur l'extrémité d'un balancier horizontal *BC* oscillant autour du point *C*, et commandant, par une bielle *DE* articulée vers son milieu, la manivelle *E*. Il se construit pour des puissances allant jusqu'à 4 chevaux. Le cylindre est refroidi par une circulation d'eau extérieure.

Le moteur Bisschop (fig. 170), construit par la maison Rouart frères, de Paris,

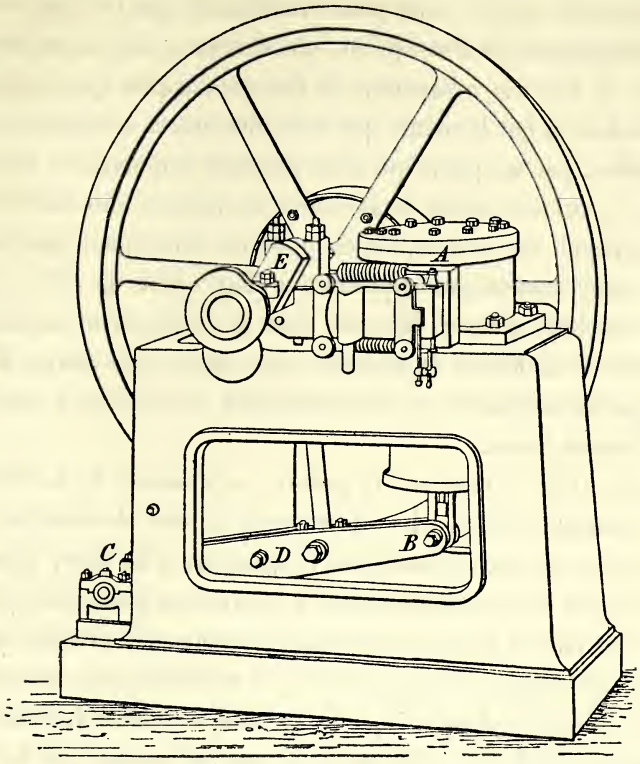


Fig. 169. — Moteur Bénier.

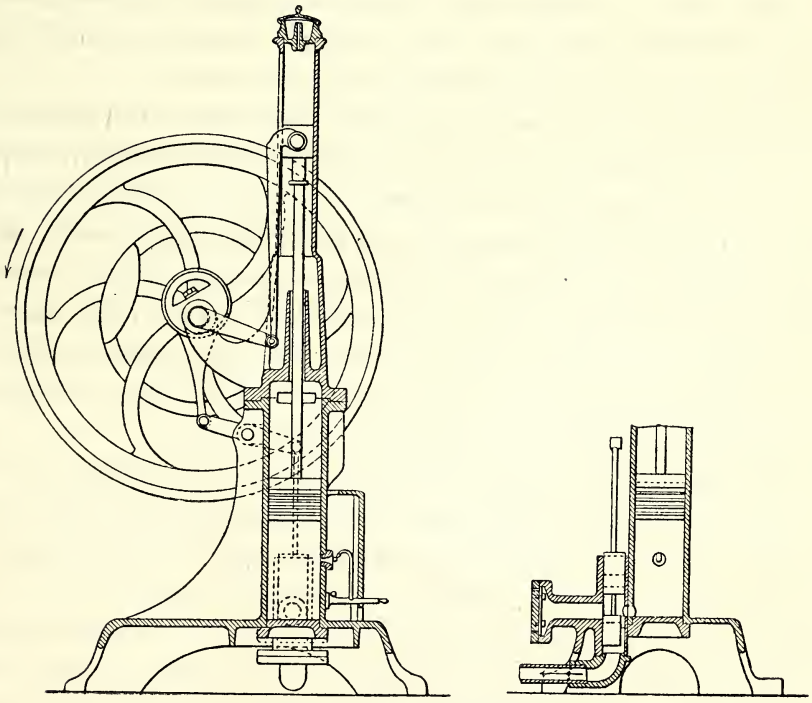


Fig. 170. — Moteur Bisschop.

avait déjà été exposé en 1878. Cette petite machine à gaz est bien connue et nous n'aurons pas à en reprendre la description, qui se trouve dans notre rapport sur l'Exposition de 1878. Il importe néanmoins de faire remarquer que le cycle du moteur Bisschop n'est pas tout à fait le même que celui des autres machines à gaz sans compression; il en diffère par un point qui n'est pas sans importance, en ce sens que la pression du gaz, en certains points de la course du piston, s'abaisse au-dessous de la pression atmosphérique. Le moteur Bisschop dérive directement du moteur Otto et Langen, qui fit si bruyamment son apparition à l'Exposition de 1867. Tout le monde se rappelle cette machine d'aspect bizarre, dont le fonctionnement était accompagné de coups de pistolet et de bruits de ferraille; aux essais, elle donna des résultats qui étonnèrent les expérimentateurs : sa consommation descendant à moins de 1 mètre cube de gaz par cheval-heure.

Dans la machine Otto et Langen, le piston, au moment de la déflagration, était dégagé de toute connexion avec l'arbre de couche; il était absolument indépendant et était lancé librement de bas en haut par l'explosion, à la façon d'un projectile; sa course était limitée par le travail négatif dû à la pression atmosphérique que le piston devait refouler; une fois en haut de sa course, le piston s'y arrêtait un instant, puis redescendait lentement, en entraînant avec lui le mécanisme de commande de l'arbre de couche; c'était pendant la descente que se produisait le travail, sous l'action du vide existant sous le piston, vide dont l'intensité se trouvait accrue par le refroidissement du gaz pendant la chute à faible vitesse, et par l'effet d'une enveloppe d'eau froide. Si, comme effet utile, la machine Otto et Langen constituait un véritable et important progrès, elle laissait beaucoup à désirer au point de vue constructif. Il ne reste aujourd'hui qu'un assez petit nombre de ces moteurs en service.

Le rendement élevé de cette machine était dû à deux causes : d'une part, la grande vitesse que prenait le piston au moment où il était lancé par l'explosion, les pertes de chaleur par les parois étant ainsi très atténuées; d'autre part, la détente très étendue, qui amenait un notable refroidissement des gaz brûlés; la chaleur sensible de ces gaz se trouvait ainsi utilement transformée en travail; ces gaz déjà refroidis n'avaient plus, pendant la course descendante, qu'à céder de la chaleur sous une faible chute de température, condition essentielle pour que le rendement se rapprochât de celui du cycle de Carnot. Ce système comportait une analyse très fine et très exacte des phénomènes thermiques qui se passent dans les moteurs à air chaud.

Tout en écartant l'action par chocs, destructive de tous les organes, M. Bisschop s'est efforcé de tirer parti de quelques-unes des idées théoriques qui ont fait le succès du moteur Otto et Langen. C'est ainsi (fig. 170) qu'il a placé l'arbre de couche excentriquement par rapport à l'axe du cylindre. La manivelle de grand rayon est attaquée par une bielle oblique; les vitesses du piston sont grandes vers la partie moyenne de sa course; au contraire, aux environs des points morts, les arcs décrits sont étendus pour un faible mouvement du piston. La machine agit à pression dans la course des-

cendante et sous l'action du vide pendant la descente; elle est donc, dans une certaine mesure, à double effet. Signalons encore l'inflammation par aspiration d'une flamme fixe et le refroidissement du cylindre par des nervures.

La consommation de ce moteur est modérée; il occupe peu de place, se transporte facilement, se met en marche instantanément, consomme très peu d'huile et supporte facilement un service continu très prolongé; il ne comporte aucun organe délicat et peut être mis entre les mains d'un ouvrier quelconque; une de ses qualités les plus précieuses, c'est qu'il n'a pas besoin d'eau de réfrigération. MM. Rouart frères ont apporté à la construction de cette machine des améliorations qui ne sont pas sans importance. Du reste, ils se sont sagement gardés de chercher à construire sur ce type des moteurs de grande puissance : c'est une machine domestique, et elle doit conserver ce caractère.

Machines à explosion avec compression préalable. — Avec la compression préalable du mélange détonant, les machines à gaz sont entrées dans une ère entièrement nouvelle. C'est ce mode de fonctionnement qui jusqu'ici, malgré le prix élevé du gaz de l'éclairage, a permis d'aborder avec ce combustible des puissances motrices considérables. A l'Exposition, toutes les machines à gaz un peu fortes, dépassant 4 ou 5 chevaux, étaient à compression préalable et fonctionnaient suivant le cycle à quatre temps.

Les machines dont il s'agit ont fait leur apparition dans la pratique lors de l'Exposition de 1878; elles étaient présentées par diverses maisons françaises ou étrangères, concessionnaires des brevets du Dr Otto. A cette époque, le centre le plus important de construction des machines Otto était la grande fabrique de Deutz, près Cologne; cette maison, qui jusqu'alors avait livré à peu près exclusivement les machines Otto et Langen, avait brusquement renoncé à cette fabrication pour se consacrer à la construction du nouveau type de moteur calorique.

C'est qu'en effet la machine à gaz à quatre temps, telle qu'elle est établie à Deutz ou dans les usines qui s'y rattachent, peut lutter avec avantage, sur le terrain de l'économie de consommation, même avec la machine Otto et Langen, qui s'était montrée si supérieure à ses rivales; elle possède, en outre, des qualités qui lui sont propres : une marche régulière, sûre, silencieuse, un entretien facile et économique, des formes élégantes, etc.

Aussi le succès de ces machines a-t-il été considérable; pour en donner une idée, il suffira de rappeler que, depuis 1878, il a été fabriqué et vendu plus de 30,000 moteurs Otto, représentant une puissance de plus de 110,000 chevaux.

Il convient d'examiner quels sont les effets de la compression préalable et dans quelles conditions le cycle à quatre temps la réalise.

Si l'on suppose que la déflagration soit instantanée, la puissance motrice est produite uniquement par la détente des gaz chauds et à haute pression, qui se trouvent derrière le piston au moment où la détonation vient d'avoir lieu. L'expansion amène le

refroidissement de ces gaz, et le travail produit a précisément pour mesure le refroidissement causé par la détente. Plus la détente, c'est-à-dire le rapport du volume final au volume initial, est prolongée, plus aussi est complète l'utilisation mécanique de la chaleur dégagée par la combustion.

Mais dans la machine à gaz sans compression, la détente a en général une limite assez rapprochée; la pression au moment de l'explosion n'étant pas très élevée, l'expansion ne peut être poussée un peu loin, sans que la pression à fin de course devienne inférieure à la pression atmosphérique. Cette conséquence a été franchement acceptée dans l'ancienne machine Otto et Langen et dans la machine Bisschop; elle conduit à des pressions moyennes assez faibles, c'est-à-dire à des cylindres volumineux, encombrants, dans lesquels les frottements et les déperditions par les parois sont fort notables.

L'autre procédé consiste à comprimer le mélange détonant avant de l'enflammer; on obtient ainsi des pressions élevées au départ, permettant une détente prolongée, l'échappement se fait encore à une pression effective notable. La pression moyenne, c'est-à-dire le travail par unité de volume engendré, reste élevée; la machine, tout en réalisant un meilleur rendement, est beaucoup moins encombrante et volumineuse.

La compression préalable peut s'effectuer, soit dans un cylindre spécial, soit dans le cylindre moteur lui-même. C'est le dernier système qui est exclusivement appliqué dans toutes les machines un peu puissantes qui figuraient à l'Exposition. Outre une plus grande simplification des organes, il offre entre autres avantages celui d'une utilisation plus complète de la chaleur dégagée par la compression.

Ces considérations sont développées avec une précision parfaite dans le brevet pris le 16 janvier 1862 par M. Beau de Rochas; on trouve, dans le même brevet, une description absolument complète du cycle à quatre temps, tel qu'il est pratiqué dans les moteurs à gaz modernes.

Dès l'année suivante, en 1863, M. Beau de Rochas laissait tomber son brevet dans le domaine public. Mais ce n'est que quinze ans plus tard, vers 1878, que les machines à quatre temps entrèrent définitivement dans la pratique courante.

C'est au docteur Otto que revient l'honneur d'avoir introduit dans l'industrie ce moteur remarquable. Nous n'examinerons pas s'il a eu connaissance de la découverte de Beau de Rochas, s'il s'en est inspiré, ou bien si, par ses propres recherches, il en est arrivé de lui-même aux mêmes conséquences que son prédécesseur; quelle que soit l'hypothèse qu'on veuille admettre, on ne peut dénier au docteur Otto le rare mérite d'avoir su discerner la véritable valeur du nouveau mode de fonctionnement, valeur méconnue par les contemporains de Beau de Rochas, d'avoir franchi les longues et laborieuses étapes qui séparent une idée théorique de son application industrielle, d'avoir inventé ces dispositifs si remarquables, qui permettent à la machine de fonctionner, enfin d'avoir doté l'industrie d'un moteur réellement pratique, à marche sûre,

régulière et économique. Le nom du docteur Otto restera inscrit à côté de ceux de Beau de Rochas, Lenoir, Hugon, Philippe Lebon, comme celui de Watt à côté des noms de Newcomen, Savery et Papin.

Le moteur Otto termine, on peut le dire, cette période des longs et pénibles tâtonnements qui précède toujours la naissance d'une industrie nouvelle; avec lui la machine à gaz est entrée de plain-pied dans les usages. Sans doute, il reste encore beaucoup à faire : c'est la période de raffinement qui commence; elle sera probablement moins longue que pour la machine à vapeur, qui d'ailleurs a fourni au nouveau moteur un contingent considérable de matériaux et de connaissances acquises.

De nombreux chercheurs se sont lancés dans le champ inauguré par le docteur Otto, et des résultats importants sont déjà acquis, ainsi que le montre l'examen des machines exposées en 1889.

Étudions de plus près le cycle à quatre temps. Il correspond, ainsi qu'on l'a vu, à quatre courses du piston.

La figure 171 représente le diagramme des pressions relevé sur une machine Otto;

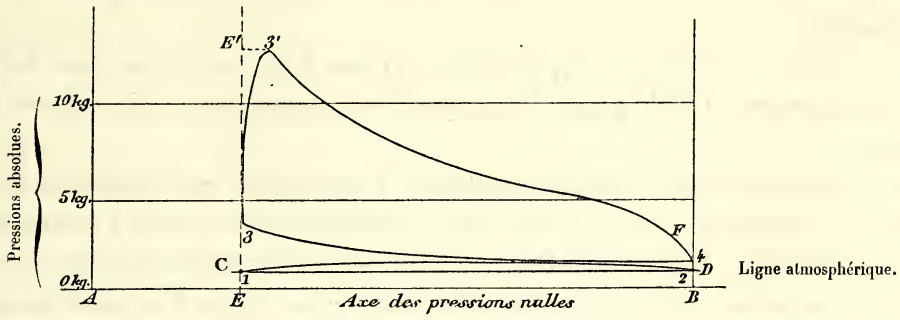


Fig. 171. — Diagramme d'indicateur relevé sur un moteur du système Otto.

il se rapproche beaucoup du cycle théorique. *AB* est l'axe des volumes, ligne des pressions nulles; *CD* est la ligne atmosphérique; *EB* est la course du piston, et *AE* l'espace mort subsistant en arrière du piston à fond de course. Le crayon de l'indicateur a tracé très nettement toutes les phases du cycle : de 1 en 2, course directe, admission du mélange détonant à une pression peu différente de la pression atmosphérique; de 2 en 3, compression du mélange, qui se trouve, à la fin de la course, refoulé dans l'espace nuisible; en 3, inflammation; de 3 en 3′, élévation rapide de la pression, suivie d'une détente 3′4; un peu avant que le piston soit à la fin de sa course, l'échappement commence, ce qui amène une dépression de la courbe figurative; enfin, de 4 en 1, expulsion partielle des produits, à une pression peu différente de la pression extérieure.

Les lignes générales du cycle restent toujours les mêmes, mais d'un constructeur à l'autre, il y a des différences de détail. Certaines maisons recherchent un rendement

C. F. E.

élevé : on y arrive facilement en réduisant l'espace mort AE, ce qui élève d'autant la pression en 3 et par suite en 3′; on peut aussi augmenter la pression en 3′ en employant un mélange plus riche, ou bien combiner ces deux moyens. D'autres constructeurs préfèrent sacrifier quelque chose sur la consommation, mais améliorer la durabilité de la machine et diminuer les frais d'entretien : à cet effet, ils en réduisent les pressions excessives, qui sont destructives de tous les organes. Tantôt on fait l'allumage à l'instant même où le piston est au point mort, ou bien avec une légère avance, de manière à éviter la perte de travail représentée sur le diagramme par le triangle $E'33'$; dans d'autres machines, l'allumage se fait avec un certain retard, quand le piston a déjà pris un peu de vitesse, ce qui tend à atténuer les chocs et les déperditions de chaleur par les parois.

Il est un autre point qui mérite d'être signalé. Si l'on jette un coup d'œil sur le diagramme (fig. 171), on voit que l'échappement commence à s'ouvrir en F, alors que la pression est d'environ 4 kilogrammes absolus; cette pression est encore assez élevée pour permettre une détente plus prolongée; certains constructeurs négligent cette économie; d'autres, en petit nombre, ont songé à en tirer parti, même au prix de quelques complications.

Ce sont là des différences d'appréciation qui sont toutes naturelles dans des questions aussi neuves; l'étude pratique aura sans doute promptement raison de ces divergences.

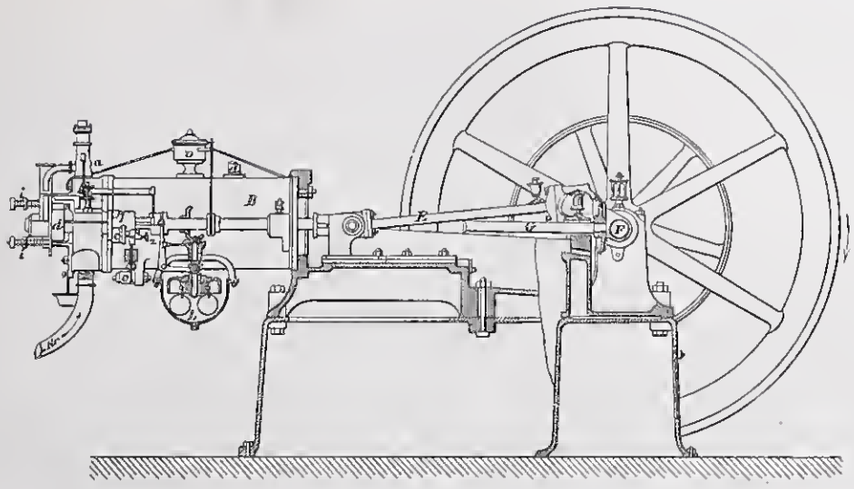
En ce qui concerne les procédés matériels d'application, les dispositions des machines, les organes et la construction, il y a, comme dans les moteurs à vapeur, de très grandes diversités. Nous allons décrire quelques-unes des plus importantes parmi les machines exposées, et au courant de cet examen, nous aurons l'occasion de signaler ces différences.

La plus importante exposition, en fait de machines caloriques, était celle de la Compagnie française des moteurs à gaz, de Paris.

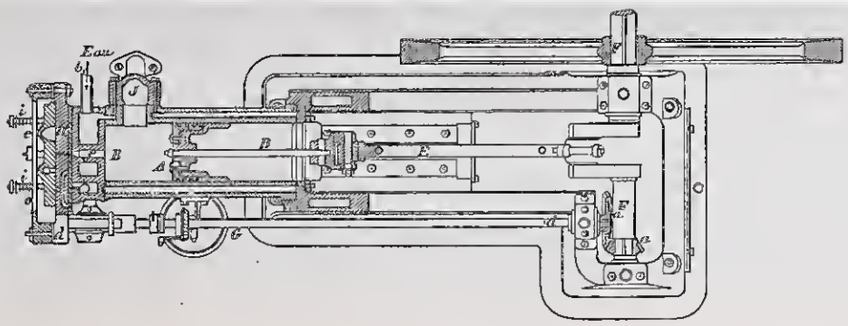
Cette intéressante exposition, qui réunissait, dans une sorte de synthèse, les types de moteurs les plus variés comme puissance et comme dispositions, a vivement attiré l'attention des ingénieurs. De l'avis de tous, cette collection de machines à gaz présentait un intérêt d'ordre supérieur : invention, exécution, succès commercial, services rendus à l'industrie, groupement des objets exposés, tout se trouvait réuni pour justifier une récompense élevée.

Le jury a attribué à la Compagnie exposante une médaille d'or. Cette décision a soulevé des critiques, la récompense a été trouvée trop faible; certains ingénieurs ont estimé, non sans quelque apparence de raison, qu'une pareille exposition méritait un grand prix. Pour un cas aussi particulier, nous jugeons nécessaire de sortir de notre réserve ordinaire, et de faire connaître les motifs qui ont déterminé le jury de la classe 52. Disons tout de suite que le mérite de l'exposition dont il s'agit a été, sans

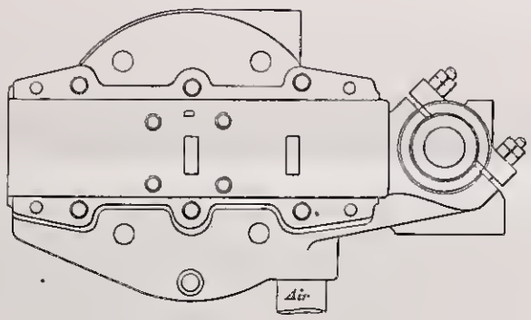
C. F. E.

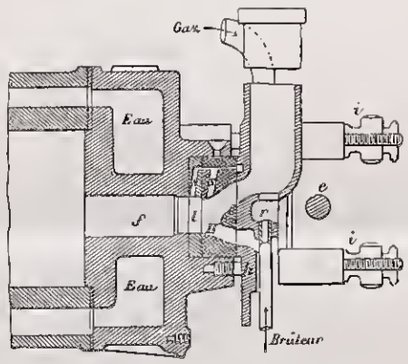


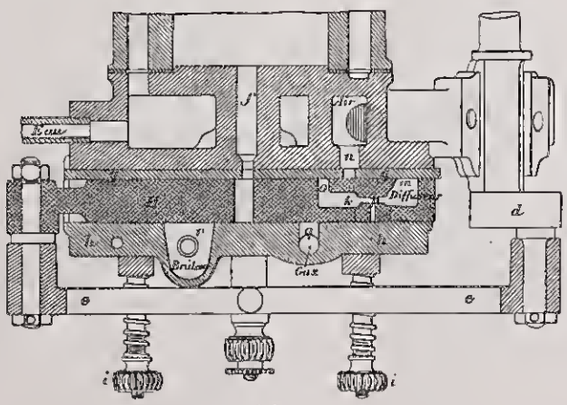
Élévation.



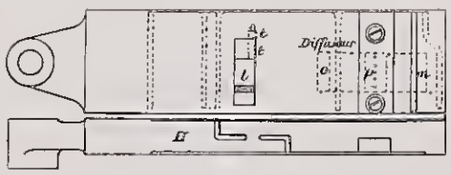
Plan.







Culasse.



Tiroir.

Fig. 172. — Moteur horizontal, système Otto (type de la Compagnie française).

contradiction, jugé de premier ordre. Le jury a été surtout frappé des progrès énormes accomplis depuis 1878 par l'industrie des moteurs à gaz, des efforts qu'elle a faits, des résultats qu'elle a réalisés et de l'avenir qu'elle s'est ouvert. La meilleure part de ces mérites revient, cela ne fait pas de doute, au docteur Otto.

Mais le docteur Otto n'était pas exposant; le jury n'avait donc pas à le récompenser. A son défaut, le constructeur eût pu faire valoir des droits, mais l'exposition n'était pas présentée sous le nom de la maison qui avait exécuté ces belles machines; l'exposant inscrit au catalogue était une société essentiellement commerciale.

C'est ainsi que, faute de pouvoir atteindre directement ceux qui auraient eu la plus grande part, soit dans la conception, soit dans l'exécution de ces admirables machines, le jury s'est vu, à son bien vif regret, contraint d'abaisser d'un degré la plus haute récompense décernée aux machines à gaz. Il est bon d'ailleurs de rappeler que le directeur de la maison qui avait construit ces machines et organisé leur installation a été décoré de la Légion d'honneur.

Nous allons décrire rapidement quelques-uns des types de machines figurant dans l'exposition de la Compagnie française des moteurs à gaz.

Rappelons en premier lieu les dispositions de la machine horizontale, laquelle a servi de point de départ à toutes les autres variétés.

La machine horizontale Otto est représentée fig. 172. Le piston *A* ne reçoit la poussée des gaz que par sa face postérieure; il en résulte que la machine ne donne qu'une impulsion motrice pour deux révolutions, ce qui exige l'addition d'un puissant volant; le cylindre *B* est ouvert en avant, de telle sorte que la paroi intérieure soit, à chaque excursion du piston, en contact avec l'air extérieur; le refroidissement est complété par une circulation d'eau *b*. La bielle *E* est articulée directement sur le piston, le cylindre moteur fonctionnant comme glissière; elle attaque par un vilebrequin l'arbre de couche *FF*.

Le cylindre est en porte à faux; il s'assemble sur un bâti américain, qui porte sur un soubassement en fonte ou en maçonnerie.

Les quatre phases du cycle se reproduisent de deux en deux révolutions de l'arbre de couche; il en résulte que l'arbre de distribution doit ne faire qu'un tour quand l'arbre de couche en fait deux; cet arbre *GG* est commandé par l'arbre de couche à l'aide d'un engrenage conique *aa*, réduisant la vitesse de moitié.

La distribution se fait par un tiroir *H* et une soupape *J*.

La soupape ne sert que pour l'échappement; elle est commandée par la came *j*, actionnant à l'aide d'un galet le levier *cc*.

Le tiroir est actionné par l'excentrique *d*, à l'aide de la bielle *ee*. Il communique avec la culasse du cylindre par la lumière unique *f*. Il a la forme d'une plaque à faces parallèles, glissant entre la glace *gg* et la contre-glace *hh*; cette dernière exerce sa pression par l'intermédiaire des boulons à ressort *i*, *i*, *i*, *i*, dont le serrage peut être réglé à la main.

IMPRIMERIE NATIONALE.

Le tiroir remplit une triple fonction :

1° Admission du mélange d'air et de gaz;

2° Fermeture de la lumière pendant la détente;

3° Allumage.

A cet effet, il comporte deux cavités *k*, *l*; la cavité d'admission *k*, au moment de l'introduction, se place de telle sorte que la branche *m* communique avec la conduite *n*, correspondant à l'air extérieur, que la branche *o* communique avec la lumière *f*, et la branche *p* avec la prise de gaz *q*; cette dernière est constituée par une série de petits trous superposés, qui laissent passer le gaz en minces filets; ces filets, rencontrant le courant d'air, s'y mélangent intimement.

Le docteur Otto attache une grande importance à ce que le mélange gazeux soit disposé dans le cylindre en couches de teneurs variables, de telle sorte qu'au moment de l'explosion la couche la plus riche soit en contact immédiat avec la flamme d'allumage; il estime que, dans ces conditions, l'allumage est plus certain, l'explosion plus rapide et la combustion plus parfaite; quant au procédé pour obtenir cette stratification, il consiste simplement, par un tracé convenable des lumières, à donner un peu de retard à l'admission du gaz; dans sa course aspirante, le piston appelle d'abord de l'air presque pur, puis un mélange de plus en plus riche en gaz; les dernières portions du mélange, à teneurs élevées, restent confinées dans l'espace neutre, au contact du tiroir.

Pendant la course de refoulement, la lumière *f* reste obturée par la partie pleine du tiroir.

L'allumage se fait par transport de flamme. Un bec fixe *r* brûle constamment à la base de la cheminée qui le surmonte.

Les petits canaux *s*, *s*, *s*, fournissent un filet de gaz, qui débouche vis-à-vis du bec fixe *r*, qui l'enflamme. Le tiroir étant rappelé vers la droite, cette flamme continue à brûler pendant un temps très court. Il s'agit de la mettre, sans l'éteindre, en communication avec le mélange détonant comprimé en *f*. L'artifice employé est des plus ingénieux. La communication avec *f* est établie d'abord par un très petit canal *tt*, qui lance avec vitesse un filet de mélange détonant; ce filet s'enflamme et, en même temps, rétablit l'équilibre de pression entre le cylindre et la cavité d'inflammation *l*; presque aussitôt la communication s'ouvre entre ces deux capacités, et le mélange s'enflamme dans le cylindre. Le système est assez délicat; mais lorsqu'il est bien établi et en bon état, il fonctionne fort régulièrement et sans ratés.

La régularité de marche est assurée par un procédé qui a été usité souvent. Il consiste à supprimer l'admission du gaz dès que la vitesse dépasse celle du régime.

A cet effet, la soupape d'admission du gaz *u* est manœuvrée, à chaque tour de l'arbre de distribution, par une came *z* montée sur cet arbre. Cette came peut coulisser le long de l'arbre sous l'action du régulateur à force centrifuge *L*; quand la vitesse normale est dépassée, les boules du régulateur s'élèvent, la came est déplacée, la soupape d'admission du gaz ne s'ouvre plus, et la machine doit faire au moins deux tours

sans nouvelle impulsion; la vitesse se ralentit; le régulateur ayant repris sa position, la came d'admission du gaz se trouve de nouveau en prise.

Pour mettre en train la machine, il suffit d'allumer le bec fixe et de faire faire à bras quelques tours au volant. Cette manœuvre n'offre pas de difficultés lorsqu'on a affaire à un moteur de faible puissance; mais il n'en est pas ainsi lorsqu'il s'agit de machines de dimensions un peu fortes, la compression qui se produit en arrière du piston opposant au mouvement une résistance beaucoup trop considérable. La difficulté est tournée de la manière suivante : la came qui commande la soupape d'échappement est solidaire d'une seconde came, montée avec elle sur l'arbre de distribution et taillée de manière à produire un échappement, non pas tous les deux tours, mais à chaque révolution de l'arbre de couche; cette seconde came, qui coulisse avec la première sur l'arbre de distribution, est mise en prise, pour le départ, de manière à supprimer la compression; dès que la machine a fait quelques tours, on remet en place la came d'échappement normal. Malgré cet artifice, la mise en train ne laisse pas que d'être assez pénible, principalement lorsqu'il est impossible de dételer la transmission commandée. C'est là d'ailleurs une difficulté qui se rencontre, à un degré plus ou moins élevé, dans la plupart des moteurs caloriques et, plus généralement, dans tous les moteurs où l'on ne dispose pas d'une réserve de pression emmagasinée à l'avance et immédiatement disponible.

Quelques mots encore sur divers organes qui complètent la machine de la manière la plus heureuse.

Le graissage du cylindre est fait par une petite roue élévatoire v, tournant dans un godet graisseur; elle distribue l'huile au tiroir et au cylindre au moyen de deux conduits inclinés et reçoit son mouvement de l'arbre de distribution au moyen d'une corde sans fin. La conduite d'échappement est souvent coupée par un récipient de grand volume, ou pot en fonte, qui atténue le bruit et le rend insensible. Des poches en caoutchouc sont montées sur les tuyaux d'amenée de gaz, afin de régulariser la pression et de supprimer les vacillations des becs montés sur la même conduite. Pour diminuer la dépense d'eau de refroidissement, on se sert souvent d'un grand réservoir, réuni à l'enveloppe réfrigérante par un double tuyau formant thermosiphon : il s'établit ainsi dans le système une circulation automatique, et l'eau chaude a le temps de se refroidir en traversant de haut en bas le réservoir.

Une bonne machine Otto de quelques chevaux de puissance ne consomme guère, en service industriel, qu'un mètre cube de gaz ordinaire par cheval-heure effectif. L'eau de réfrigération est à compter pour 35 à 40 litres par cheval-heure, et l'emploi d'un réservoir convenable permet de réduire presque à rien la dépense d'eau. Le graissage ne coûte guère plus que celui d'une machine à vapeur de même puissance.

Nous nous sommes étendu avec quelques détails sur cette admirable machine, qui peut être considérée comme le prototype de la plupart des autres moteurs à compres-

sion. Cette description nous permettra de passer rapidement sur les autres moteurs analogues qui figuraient à l'Exposition. La Compagnie française des moteurs à gaz présentait un grand nombre de machines, plus ou moins calquées sur ce modèle et de puissances variées allant jusqu'à 25 chevaux.

Pour des puissances plus considérables, la même Compagnie attelle sur un même arbre deux ou quatre machines simples. Cette combinaison n'a pas seulement l'avantage de simplifier la construction et l'entretien par la répétition d'organes identiques et interchangeables : elle a surtout pour objet d'assurer d'une manière plus parfaite la régularité d'allure. Pour l'éclairage électrique par incandescence, notamment, la machine monocylindrique à quatre temps est pratiquement insuffisante; les variations de vitesse, résultant du mode même de fonctionnement, se traduisent, dans les lampes, par des battements de lumière très fatigants. Pour de pareilles applications, on attelle sur un même arbre deux cylindres parallèles, et l'on dispose la distribution de telle sorte, qu'à chacune des révolutions l'un des deux cylindres alternativement donne une impulsion. On arrive ainsi, grâce à la grande vitesse de rotation du volant, à une uniformité très satisfaisante. Ce dispositif s'applique même à des puissances qui ne sont pas très grandes.

On voyait, dans l'exposition de la Compagnie française, une grande machine faisant 100 chevaux effectifs. Elle était composée de quatre cylindres attaquant un même arbre par deux vilebrequins; deux cylindres étaient disposés à droite, deux à gauche de l'arbre et faisant vis-à-vis au premier groupe; la distribution était réglée de manière à produire successivement une impulsion dans chacun des cylindres; on avait ainsi, au point de vue de la régularité du mouvement moteur, l'équivalent d'une machine à vapeur à double effet. Cette machine a fait le service de l'éclairage électrique d'une partie du palais pendant la durée de l'Exposition, et de la manière la plus satisfaisante. On conçoit que, pour un organisme de cette dimension, la question de la mise en train prend une importance particulière et ne saurait être résolue par les mêmes procédés que pour les moteurs de quelques chevaux. La mise en train était faite par un moteur spécial : c'était une petite machine à gaz, actionnant un train de courroies et de poulies; le dernier mobile pouvait, à l'aide d'un levier, être appuyé sur la jante du volant. Dès que la machine principale était partie, la poulie d'entraînement se séparait du volant, et la machine de mise en train pouvait être stoppée.

La Compagnie française des moteurs à gaz exposait aussi des machines à explosion du type vertical. Faciles à installer, n'exigeant aucune fondation, occupant fort peu de place, ces moteurs conviennent fort bien pour la petite industrie. La figure 173 représente la coupe d'une de ces machines.

Le cylindre *A* placé verticalement, l'ouverture en haut, est entouré d'une circulation d'eau, constituée par une enveloppe *B*, qui porte, par deux pattes venues de fonte, les deux paliers de l'arbre de couche; la transmission du piston à la manivelle est directe; la machine est assise sur une large base circulaire *CC*. La distribution est faite par

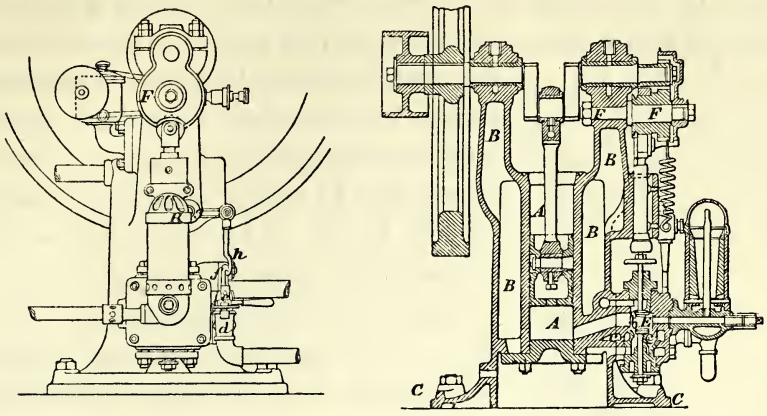


Fig. 173. — Machine à explosion de la Compagnie des moteurs à gaz.

soupapes; la soupape d'admission *b*, appuyée sur son siège par son propre poids et par un léger ressort, se soulève automatiquement par le fait de l'aspiration produite par le piston; en se levant, elle démasque, non seulement l'orifice central de son siège, qui livre passage à l'air, mais encore une série de trous percés sur le pourtour dudit siège, lesquels livrent passage au gaz fourni par le canal annulaire *cc*.

L'échappement se fait par la soupape *E*, appuyée sur son siège par un ressort; cette soupape est manœuvrée par une came montée sur l'arbre *FF*, lequel reçoit, par un engrenage, un mouvement de rotation moitié moins rapide que celui de l'arbre de couche. Le cycle de ces machines est à quatre temps, comme celui des moteurs Otto horizontaux. La régulation s'obtient également par la suppression de l'arrivée du gaz lorsque la vitesse dépasse celle de régime. La commande de la prise de gaz est faite par un régulateur d'inertie, mais qui diffère beaucoup, comme dispositif et mode d'action, du régulateur à force centrifuge, que nous avons vu appliqué, d'une manière presque exclusive, à toutes les machines motrices que nous avons étudiées jusqu'ici.

Le gaz est délivré par un robinet gradué *d*, et admis par une petite soupape *e*, dont la tige *f* est actionnée par un excentrique calé sur l'arbre de distribution; cette transmission s'opère à l'aide d'une bielle brisée *gh* terminée par un crochet; l'articulation de cette bielle permet à la partie inférieure *h* de dévier de la verticale, et par conséquent au crochet qui la termine d'échapper la tige de la soupape; cette partie de la bielle porte un bras en équerre terminé par un contrepoids *R*, lequel, en régime normal, tend à ramener le crochet à la position de la prise sur la tige de la soupape; mais, si l'allure de la machine dépasse une limite déterminée, la vitesse de la bielle est plus grande que la vitesse de chute du contrepoids *R*; celui-ci reste en arrière, écarte le crochet *h*, lequel manque la tige de la soupape, et l'admission du gaz est supprimée. Ce système, fort simple et élégant, se retrouve, sous des formes variées, dans un grand nombre de machines à gaz de l'Exposition.

L'allumage, dans le type de moteur que nous examinons, est obtenu par deux dis-

positifs différents; certains de ces moteurs comportent un tiroir spécial, analogue à celui des moteurs horizontaux, mais beaucoup plus simple, et opérant l'allumage par transport de flamme. Mais dans d'autres moteurs, l'allumage est réalisé par un système tout différent et extrêmement ingénieux; la figure 174 en représente un exemple. Le cylindre communique librement avec un bout de tube en fer vertical *l*, fermé dans le haut et chauffé dans le bas au rouge incandescent. Pendant la période de compression, les gaz brûlés contenus dans ce tube sont comprimés par le mélange détonant, qui vient de lui-même s'enflammer au contact de la zone incandescente; la détonation ainsi amorcée se propage jusque dans le cylindre. Quant au chauffage du tube, il s'opère au moyen d'un bec Bunsen permanent, dont le tube occupe l'axe et qui est disposé de telle sorte, que la région chaude et non oxydante de la flamme occupe précisément la partie basse de l'allumeur. Le système, une fois bien proportionné et bien réglé, fonctionne très régulièrement; il permet d'aborder des vitesses considérables, allant jusqu'à 300 tours à la minute, ce qui est fort avantageux lorsque l'on cherche à réduire le poids et l'encombrement des moteurs.

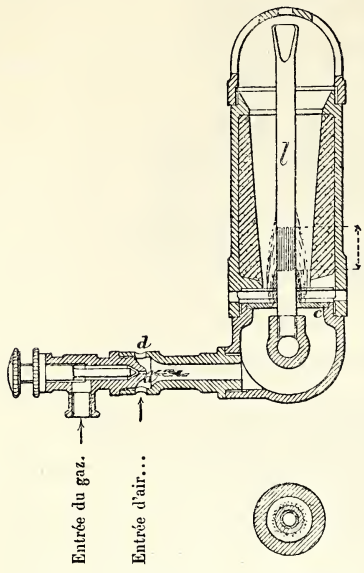


Fig. 174. — Système pour l'allumage employé dans le moteur Otto.

Les petites machines verticales de 1/2 et 1/4 de cheval, exposées par la Compagnie des moteurs Otto, étaient extrêmement élégantes comme dessin et exécution, et fonctionnaient avec une régularité parfaite.

Les détails dans lesquels nous sommes entré en décrivant les machines Otto nous permettront d'abréger beaucoup l'examen des autres moteurs fonctionnant d'après les mêmes principes, et qui étaient fort nombreux à l'Exposition.

Les moteurs Otto étaient également présentés par la maison anglaise Crossley frères, de Londres, qui présentait des types fort divers, horizontaux et verticaux, de puissance variant depuis 1/2 cheval jusqu'à 28 chevaux. Les dispositions générales ne diffèrent guère de celles recommandées par Otto; mais on remarque dans ces machines certains détails ingénieux, un dessin fort élégant et une exécution admirable. MM. Crossley appliquent à toutes leurs machines l'allumage par tube incandescent, que nous avons décrit ci-dessus; mais pour obtenir une régularité plus complète, ils interposent, sur la conduite reliant ce tube au cylindre, une petite soupape manœuvrée par l'arbre de distribution. L'uniformité d'allure est obtenue par un régulateur d'inertie, simple et bien agencé. Cette exposition, sans comporter des nouveautés bien saillantes, est néanmoins fort remarquable par le bon aspect des appareils et le sens pratique qui se manifeste aussi bien dans l'ensemble que dans les moindres détails.

M. Lenoir est, comme on sait, l'inventeur de la première machine à gaz qui ait fonctionné d'une manière réellement industrielle; cette machine était à double effet et sans compression. Dans ses dernières créations, M. Lenoir a abandonné son système primitif, pour adopter le fonctionnement à quatre temps. Les nouvelles machines Lenoir étaient exposées par la maison Rouart frères, de Paris. Les dispositions d'ensemble de ces machines se rapprochent de celles des machines Otto (fig. 175); le

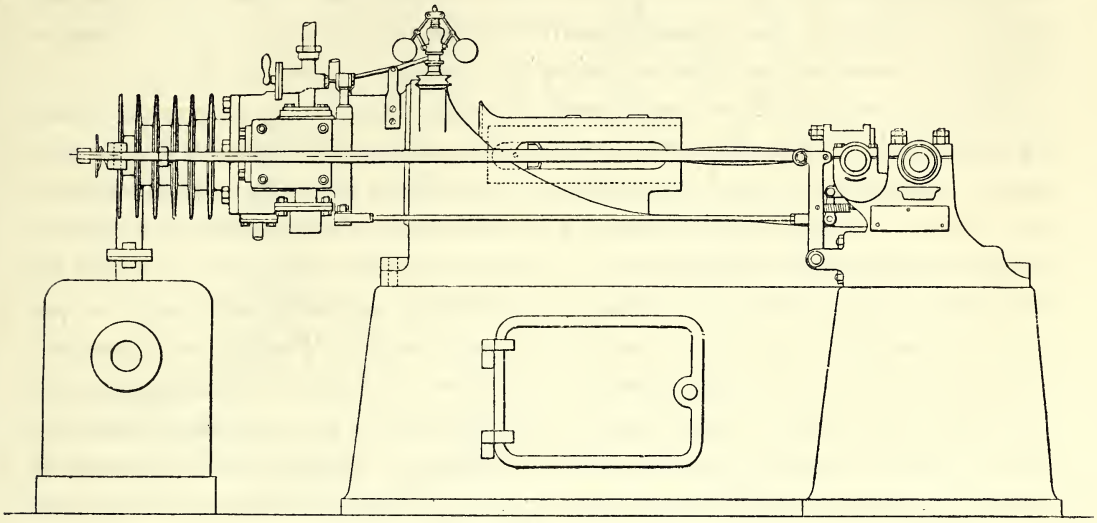


Fig. 175. — Moteur à gaz système Lenoir, construit par MM. Rouart frères.

cycle est à peu près le même; le cylindre horizontal et en porte à faux est à simple effet; il commande par connexion directe la manivelle de l'arbre de couche; en vue de diminuer l'usure inégale du cylindre, on a interposé entre le piston et la bielle une tige et une crosse coulissant dans une glissière circulaire. Le cylindre proprement dit, dans lequel se meut le piston, se termine par une culasse rapportée; le joint est fait en carton d'amiante, de manière à atténuer la communication de chaleur. Le cylindre seul est refroidi par une circulation d'eau; la culasse est simplement rafraîchie par des nervures fortement saillantes; ce dispositif a pour objet de réduire les pertes de la chaleur par les parois; la culasse constitue la chambre de compression et d'inflammation.

Dans les moteurs de faible puissance, jusqu'à 2 chevaux, la circulation d'eau est supprimée, et le refroidissement du cylindre est obtenu par des ailettes saillantes. Pour les grosses machines, une disposition nouvelle et fort intéressante a permis de diminuer dans une forte proportion la consommation d'eau réfrigérante : le cylindre est entouré d'une simple bâche, ouverte par le haut et pleine d'eau; cette eau atteint assez promptement la température de 100 degrés, et, à partir de ce moment, elle s'évapore lentement, en entraînant avec elle, sous forme de chaleur latente, l'excédent de chaleur fourni par le cylindre; il suffit de fort peu d'eau pour entretenir le niveau dans la

bâche, et la température des parois du cylindre reste assez faible pour permettre un graissage très satisfaisant avec des huiles minérales lourdes. La distribution comporte :

Pour l'admission de l'air, une soupape automatique, se soulevant pendant l'aspiration;

Pour l'admission du gaz et pour l'échappement, deux soupapes commandées, à l'aide de tringles et d'excentriques, par l'arbre de distribution; ce dernier reçoit son mouvement de l'arbre de couche par un train d'engrenages réduisant la vitesse de moitié. Le courant de gaz combustible arrive dans la chapelle de la soupape d'aspiration d'air en traversant un diffuseur, qui opère le mélange intime des deux gaz.

L'allumage est produit par une étincelle électrique, fournie par le courant induit d'une bobine de Ruhmkorff; celle-ci est alimentée par une pile Delaurier à deux éléments; le courant n'est fermé que pendant un instant très court, de manière à économiser l'usure de la pile, qui n'a besoin d'être remontée qu'à d'assez longs intervalles; la fermeture du courant est obtenue par le frottement d'une came calée sur l'arbre de distribution avec une touche; les surfaces sont nickelées, la touche est mobile : ce qui permet de modifier à la main, et même pendant la marche, l'instant de l'allumage; l'expérience montre qu'en allure normale, il convient de donner à l'allumage une légère avance. La machine est gouvernée par un régulateur à force centrifuge, qui supprime l'arrivée du gaz dès que la vitesse de régime est dépassée; voici comment il fonctionne : la bielle de l'excentrique qui commande la soupape d'admission du gaz est brisée; elle se termine par un doigt articulé, qui, à chaque excursion, vient appuyer sur le bout de la tige de la soupape; ce doigt est suspendu à la douille du régulateur; lorsque celle-ci s'élève au delà d'une certaine hauteur, le doigt manque la tige, et l'admission du gaz est suspendue. Ce système, fort simple, fonctionne très régulièrement; le régulateur, n'ayant pour ainsi dire aucun frottement à surmonter, peut être très léger et de faibles dimensions.

Pour la mise en train, on ouvre un petit robinet qui envoie à l'échappement une partie du mélange détonant; la compression est ainsi considérablement diminuée. Il est bon, lors du départ, de supprimer l'avance à l'allumage; on la rétablit aussitôt que la machine a pris son allure.

Le nouveau moteur Lenoir, lorsqu'il est bien réglé, a une marche fort économique; dans des essais récents, exécutés sur une machine de 16 chevaux à deux cylindres, on n'a brûlé que 600 litres environ de gaz par heure et par cheval mesuré au frein. Il faut dire que, pour arriver à ce résultat remarquable, il est nécessaire de pousser la compression plus loin qu'on ne le fait généralement dans les moteurs Otto; néanmoins la marche ne laisse pas que d'être fort douce et régulière.

Les petites machines verticales du système Koerting-Lieckfeld, construites et exposées par la maison G. Boulet et Cie, de Paris, sont fort remarquables par leur simplicité et leur régularité de marche. Comme dispositions générales (fig. 176), elles ne diffèrent

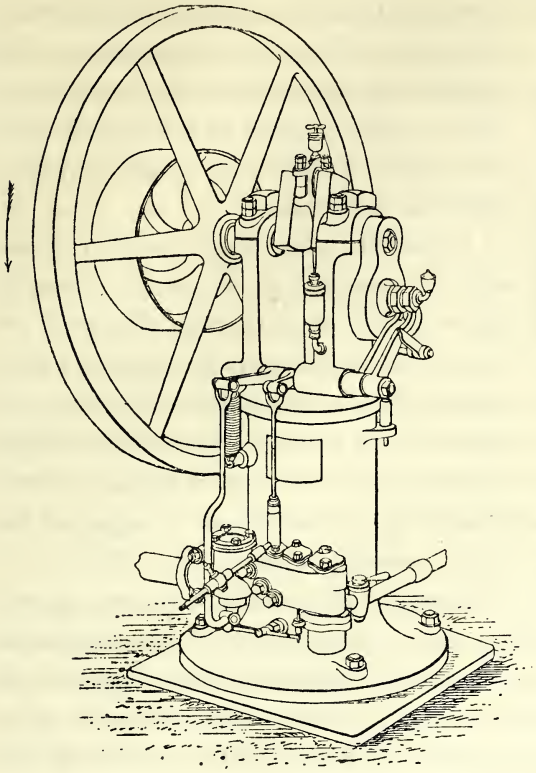


Fig. 176. — Moteur Koerting-Lieckfield.

pas des moteurs verticaux d'Otto : cycle à quatre temps, cylindre vertical, avec circulation d'eau, arbre de couche supérieur, porté par deux oreilles venues de fonte avec l'enveloppe. L'admission de l'air et celle du gaz se font par soupapes automatiques; l'échappement, par une soupape que commande un excentrique calé sur l'arbre de distribution.

Il existe dans cette machine deux dispositifs remarquables qu'il convient de décrire; ce sont les systèmes de régulation et d'allumage.

La régulation se fait par l'échappement : dès que la vitesse de régime est dépassée, la soupape d'échappement ne se referme pas, de sorte que l'aspiration de l'air et celle du gaz combustible se trouvent suspendues, l'intérieur du cylindre restant en communication permanente avec l'atmosphère. A cet effet, l'arbre moteur porte, logé dans la roue dentée qui commande la distribution, un petit régulateur à force centrifuge, constitué par une masse excentrée *A* (fig. 177), mobile autour du point d'articulation *a*, et rappelée constamment par le ressort *b;* quand la vitesse normale, qui est fonction de la flexibilité du ressort et du poids de la masse excentrée, vient à être dépassée, cette masse s'écarte et vient toucher le galet *d,* qui, par un système d'enclenchement, met à l'arrêt la soupape d'échappement dans la position d'ouverture.

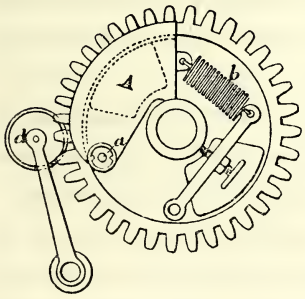
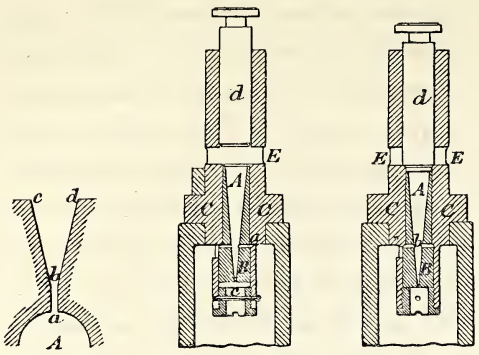


Fig. 177.
Moteur Koerting-Lieckfield.
Régulateur.

L'allumage est produit à l'aide d'un dispositif imaginé par M. Koerting. En voici le principe (fig. 178 *a*). Imaginons un réservoir *A* plein de mélange tonnant sous pression; il communique librement, par un canal très étroit *ab*, avec un ajutage vertical *bcd* évasé en forme de cône allongé; le mélange s'échappera par cet ajutage et le parcourra en prenant des vitesses variées, qui seront, à chaque point, en raison inverse de la section transversale offerte à l'écoulement; la vitesse, très grande au sommet du cône, ira constamment en diminuant jusqu'à la base *cd*, où elle sera très faible. Approchons une flamme de cette base : le mélange qui s'en échappe s'enflammera, et l'inflammation se communiquera à l'in-



a. Schéma de l'allumage. *b.* Allumeur ouvert. *c.* Allumeur fermé.

Fig. 178. — Moteur Koerting-Lieckfield. Allumage.

térieur de l'ajutage, en sens inverse du courant gazeux. Mais cette propagation ne se prolonge pas indéfiniment; la flamme s'arrête et se fixe au point où la vitesse du courant gazeux est égale à la vitesse de propagation de la flamme.

La fusée Koerting, dans laquelle ce principe est appliqué, est représentée dans la figure 178 *b* et *c*. Le cône allongé *A* est creusé dans un plongeur *B*, qui glisse à frottement doux, en formant piston, dans le cylindre *CC*; la pression du mélange repousse ce plongeur vers le haut et applique contre son siège l'embase *aa*; une soupape *d*, manœuvrée par la distribution, s'applique sur les bords du cône et pèse sur le plongeur, qu'elle maintient abaissé (fig. 178 *c*).

Au moment de l'allumage (fig. 178 *b*), la soupape *d* est soulevée, le mélange gazeux qui remplit le cône vient s'allumer au contact d'un brûleur fixe en *E*; immédiatement la soupape *d* s'abaisse, en refoulant le plongeur *B*; l'écoulement étant supprimé, la flamme se propage dans l'intérieur du cône et vient, par les petits canaux *bb* et *cc*, communiquer la combustion au mélange détonant. Ces mouvements se succèdent très rapidement, de sorte que la dépense de mélange pour l'allumage est fort petite. Le système Koerting-Lieckfeld était également appliqué à une belle machine à gaz exposée par la Société suisse de constructions de Winterthur.

Nous arrivons à l'une des tentatives les plus hardies et les plus intéressantes de l'Exposition. Quoiqu'elle n'ait pas été couronnée d'un plein succès, elle ne mérite pas moins d'être étudiée avec attention.

Le hangar établi par le Comité d'installation de la classe 52 sur le bas-port de la Seine, en aval du pont d'Iéna, renfermait les pompes et autres machines hydrauliques en fonction. La maison Ch. Powell, de Rouen (actuellement Matter et Cie), s'était chargée de fournir la force motrice pour activer ces machines. A cet effet, elle avait établi un puissant moteur à gaz, qu'elle comptait alimenter au moyen d'un gazogène spécial. Malheureusement l'appareil ne put fonctionner pendant l'Exposition. Ne comptant qu'à demi sur la réussite immédiate d'un système aussi nouveau, le Comité d'installation avait pris à l'avance ses mesures pour pouvoir le remplacer sans délai, au moyen d'une locomobile, que M. Aubert avait mise, avec beaucoup de complaisance, à la disposition du Comité; grâce à cette précaution, le service de la force motrice dans l'annexe de la berge n'eut pas à souffrir d'interruption; d'ailleurs la machine à explosion de M. Powell put fonctionner vers la fin de l'Exposition, en brûlant du gaz d'éclairage, qui lui fut fourni par une canalisation installée à cet effet et branchée sur les conduites de la ville.

Tel qu'il était, ce moteur constituait par lui-même un objet des plus remarquables; en effet, il fournit une puissance d'environ 75 chevaux; et c'est le seul, de tous les moteurs à gaz figurant au Champ de Mars, qui réalise, à l'aide d'un cylindre unique, une puissance aussi considérable.

Le moteur en question a été établi sur les plans de MM. Delamare, Deboutteville et Malandin, qui lui ont donné le nom de *moteur Simplex;* d'autres machines du même système, mais de puissance moindre, étaient exposées par différentes maisons, la Compagnie des fonderies et forges de l'Horme, Steinlen et Cie, de Mulhouse, etc.

Cette machine est représentée par les figures 179 à 183. Le fonctionnement est à quatre temps et à simple effet, comme dans les machines Otto. Le cylindre est enveloppé d'une circulation d'eau. La distribution est commandée par un arbre spécial *AA*, qui reçoit son mouvement de l'arbre de couche par engrenages réduisant la vitesse de rotation dans le rapport de 1 à 2. La distribution se fait par deux organes, un tiroir et une soupape. Le tiroir *BB*, mis en mouvement par l'arbre de distribution à l'aide d'une manivelle et d'une coulisse, comporte une lumière d'admission *a* du mélange détonant, et une lumière *b* d'allumage, laquelle, au moment voulu, se présente devant un inflammateur, constitué par une pointe de platine lançant une étincelle d'induction. Le mélange est préparé dans la boîte *C*, où arrivent l'air par *D* et le gaz par *E*; le passage du gaz est réglé par la soupape *F*, qui, par un mécanisme qui sera décrit ci-après, reste fermée lorsque la machine dépasse sa vitesse de régime. L'échappement est donné par la soupape *G*; cette soupape, maintenue par les ressorts *cc*, est soulevée en temps utile par l'arbre de distribution, à l'aide d'une transmission ingénieuse : une came, montée sur cet arbre, agit sur le galet *d* et soulève, par la tringle *ee*, le levier *ef*, lequel actionne la soupape *G* par le galet *g*. L'effort à exercer sur la soupape est très variable : il est considérable au premier instant, lorsque la soupape se détache de son siège, puis il décroît rapidement; on a eu l'idée de faire varier en conséquence le bras du levier agissant sur la soupape, et, à cet effet, on a terminé ce levier par un appendice *fh*, sorte de came, appelée *crocodile,* dont le point de contact avec le plan qui la supporte s'éloigne vers la droite au fur et à mesure que la soupape se soulève.

Les organes de régularisation sont aussi fort simples et bien entendus; on a vu plus haut que l'admission de gaz combustible est supprimée dès que la vitesse de régime est dépassée; ce résultat est obtenu à l'aide d'un pendule *IK* représenté à grande échelle (fig. 183), oscillant autour d'un centre fixe *I*, et dont la masse mobile *K* est écartée par un toc fixé à la tige du tiroir de distribution; si la vitesse n'est pas trop grande, cette masse retombe en suivant le toc dans son mouvement rétrograde; si la vitesse dépasse une certaine limite, le contact cesse, et alors la lame *k* s'incline en tournant sur son axe, et échappe la tige *l* de la soupape d'admission *F*, laquelle, par suite, cesse de s'ouvrir.

Le procédé de mise en train est fort élégant. Le piston étant arrêté à mi-course, on fait pénétrer dans le cylindre, par des robinets convenablement ouverts, un mélange

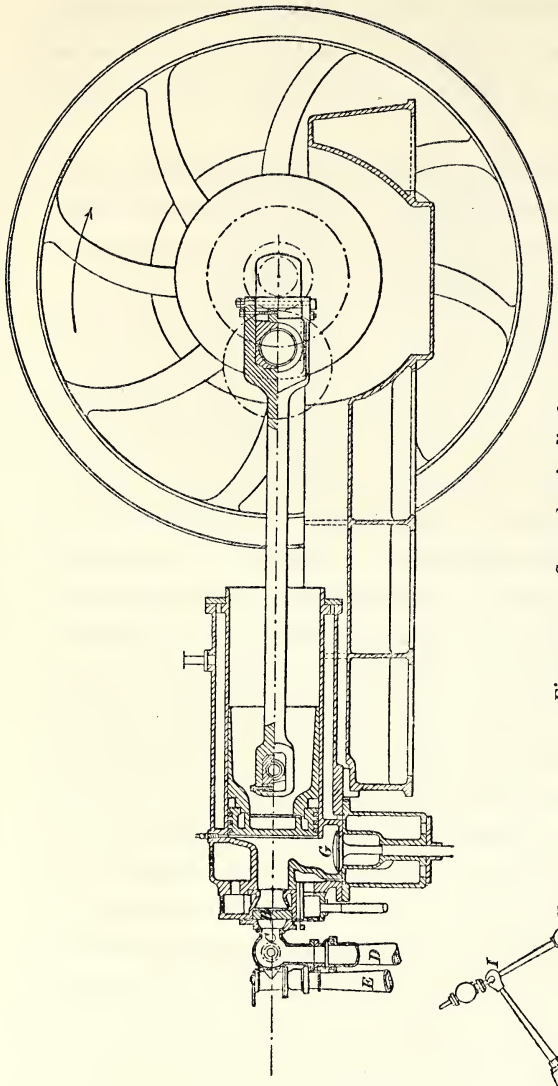


Fig. 179. — Coupe longitudinale.

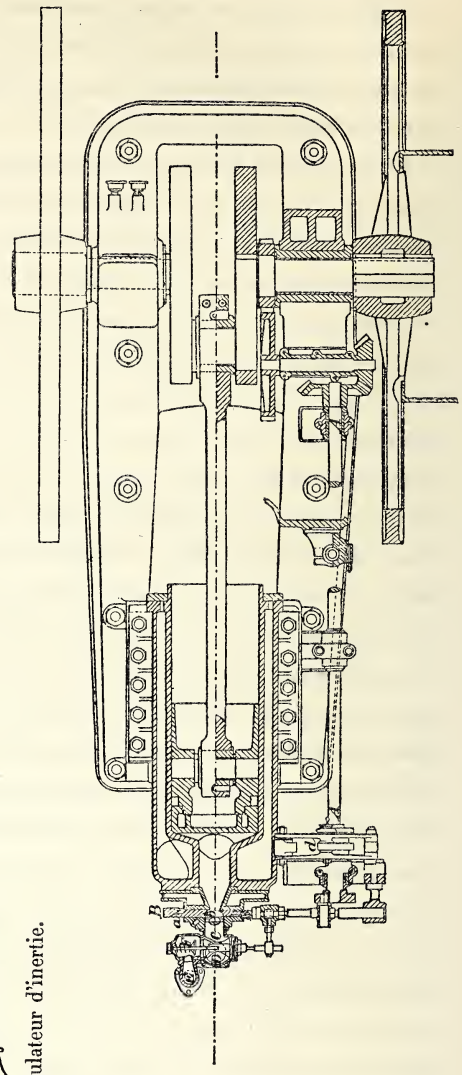


Fig. 180. — Coupe horizontale.

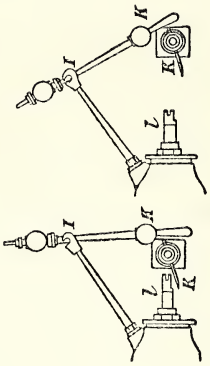


Fig. 183. — Régulateur d'inertie.

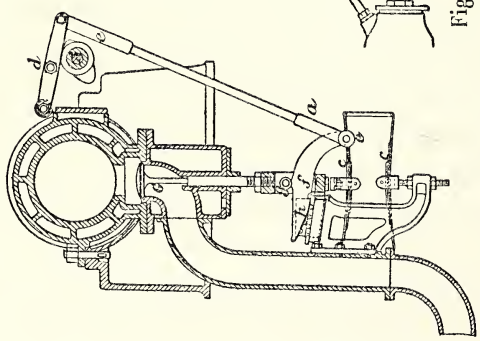


Fig. 181. — Coupe transversale par la soupape d'échappement.

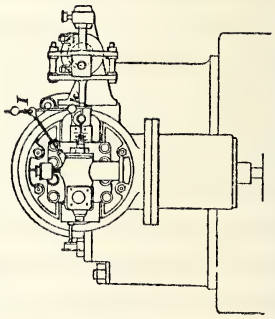


Fig. 182. — Élévation du côté de la culasse.

détonant, qui chasse peu à peu les gaz inertes; au bout de quelques instants, le déplacement est complet; on donne le feu, et la machine est lancée; en quelques tours, elle atteint sa vitesse de régime.

Les dimensions de la machine exposée étaient les suivantes :

Diamètre du cylindre	575 millim.
Course du piston	950

Cette machine a été soumise récemment à des expériences : le gaz combustible était fourni par un gazogène Dowson. A la vitesse de 100.8 tours à la minute, la puissance développée a été de 76.8 chevaux avec frein; la compression donnait 5 kilogr. 8 par centimètre carré effectifs, correspondant à une pression explosive de plus de 11 kilogr. 1/2 effectifs; l'allumage était réglé avec un retard d'environ 1/7 de la course du piston; ce retard a pour effet d'abaisser la pression maxima, et peut-être d'atténuer les pertes de chaleur par la paroi. Les consommations dans ces essais ont été les suivantes, par heure et par cheval mesuré au frein :

Anthracite du gazogène	0^k 516	0^k 612
Coke pour la petite chaudière du gazogène	0 096	
Eau (circulation, chaudières)		60 litres.
Huile et graisse		4 gr. 19

Ces résultats sont fort remarquables; le chiffre de 0 kilogr. 612 de combustible par heure et par cheval n'a pas été réalisé jusqu'ici même par les machines à vapeur les plus perfectionnées. Il permet de bien augurer de l'avenir des moteurs à explosion desservis par gazogène.

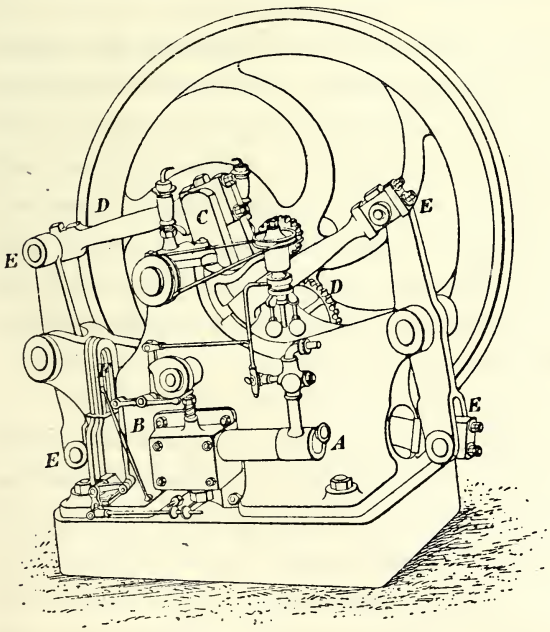


Fig. 184. — Moteur à gaz système Pers et Forest, construit par M. Em. Delahaye.

M. Delahaye, de Paris, expose un moteur d'une forme assez particulière (fig. 184), étudié par MM. Pers et Forest. Deux cylindres à simple effet *A* et *B*, réunis dos à dos, sont disposés horizontalement dans le bas de la machine, à laquelle ils servent de piédestal; l'arbre de couche placé au-dessus porte deux manivelles *C*, directement opposées, que les pistons attaquent à l'aide des bielles *DD* et des balanciers *EE*. Le fonctionnement est à quatre temps. Au point de vue du nombre des impulsions et de la régularité du

mouvement, ce système est l'équivalent d'une machine à deux cylindres attaquant une seule manivelle. La distribution se fait par soupapes. L'allumage est obtenu par l'étincelle d'induction qu'envoie une petite machine magnéto *F*. Ce qu'il y a de remarquable dans cette machine, c'est le groupement des organes, qui la rend extrêmement compacte et facile à installer partout et sans grands frais.

M. Niel, de Paris, produit la distribution à l'aide d'un organe animé d'un mouvement de rotation continu; ce distributeur (fig. 185) est constitué par un robinet à bois-

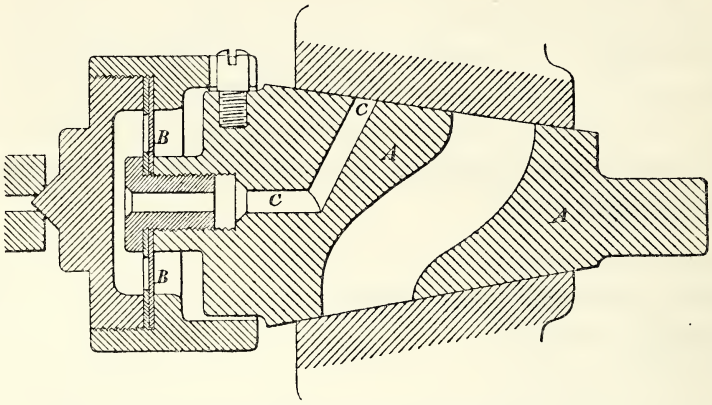
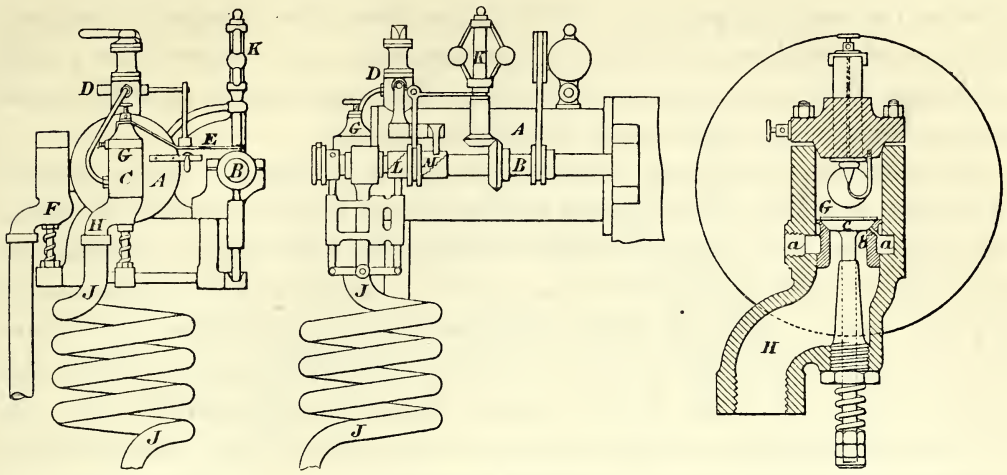


Fig. 185. — Distributeur Niel.

seau percé d'ouvertures convenables; mais, comme on sait, les organes de cette nature ne sont étanches qu'à la condition que la clef soit fortement serrée contre le boisseau; et alors les frottements deviennent importants et absorbent beaucoup de travail. Pour échapper à ce double inconvénient, M. Niel a eu recours à un artifice ingénieux, susceptible d'autres applications : à l'état ordinaire, la clef tourne libre dans son boisseau; elle ne se serre qu'au moment voulu, c'est-à-dire quand la pression se produit dans le cylindre; à cet effet, cette clef *A* est solidaire d'une membrane métallique *BB*, qui reçoit la pression par l'intermédiaire du petit canal *cc*; sous l'action de cette pression, la membrane fléchit légèrement et serre la clef contre le boisseau.

M. Charon (Louis), constructeur à Solre-le-Château (Nord), expose un moteur, qu'il désigne sous le nom de *l'incomparable,* et dans lequel il s'est efforcé d'obtenir un résultat qu'ont poursuivi nombre d'inventeurs : il a cherché à proportionner la consommation de gaz à la résistance à surmonter, sans interrompre l'action motrice de la machine. Le cycle du moteur Charon est à quatre temps, mais le volume de mélange tonnant admis est variable par l'action du régulateur. La figure 186 représente cette machine. En *A* est le cylindre; *B* est l'arbre de distribution, dont la vitesse de rotation est moitié de celle de l'arbre de couche. Sur cet arbre sont montées les cames, qui agissent, par des leviers appropriés, sur les divers organes de la machine, savoir : la



Élévation en bout. Élévation latérale du cylindre. Admission et allumage du mélange tonnant.

Fig. 186. — Moteur Charron.

soupape *C* d'admission du mélange, le tiroir *D* d'admission du gaz, le contact électrique *E* et enfin la soupape d'échappement *F*. Le mélange se forme et s'allume dans la chambre *G*, montée sur la culasse du cylindre, et dans laquelle le gaz afflue par les canaux *aa* et *bb*, et l'air par la tubulure *H*. Sur cette tubulure est monté un long serpentin *JJ*, que l'air traverse pour se rendre dans la chambre d'inflammation *G*, et qui joue un rôle capital dans le fonctionnement du moteur. En effet, la soupape *C* reste ouverte pendant une partie de la course rétrograde du piston, et par conséquent le mélange introduit dans le cylindre, au lieu d'être comprimé, est simplement refoulé par la tubulure *H* dans le serpentin *JJ*, où il s'emmagasine, pour être repris et aspiré dans un cycle ultérieur; la durée de cette levée de la soupape *C* est variable avec la position du régulateur *K*; quand les boules s'élèvent, cette durée diminue; par conséquent, le volume du mélange actif et le degré de compression de ce mélange diminuent en proportion. Cette solution d'un problème souvent poursuivi est évidemment fort ingénieuse. Quant à la transmission du régulateur à la soupape, elle se fait par l'intermédiaire de la came à échelon *L*, laquelle se déplace le long de l'arbre de distribution; une came *M*, symétrique et solidaire de la première, fait varier la durée d'ouverture du distributeur de gaz *D*. Dans la machine exposée, le refoulement dans le serpentin pouvait s'étendre de 4/10 à 8/10 de la course du piston. On remarquera que le volume du mélange enfermé étant, avant la compression, toujours plus petit que celui d'une cylindrée, la détente se trouve prolongée plus loin que dans les moteurs ordinaires à quatre temps. Il y a dans la conception de cette machine un ensemble d'idées ingénieuses, qui pourront peut-être servir de point de départ à des perfectionnements sérieux des moteurs à gaz.

Les moteurs à compression que nous avons étudiés jusqu'ici donnent, dans chaque

cylindre, une impulsion pour deux révolutions du volant. Pour échapper à l'irrégularité de marche résultant de ce mode de fonctionnement, on a recours à des volants très lourds; ou bien on accouple les cylindres par deux ou par quatre, procédé coûteux et qui ne saurait être accepté comme une solution générale.

On a cherché à tourner cette difficulté; l'Exposition présentait un certain nombre de moteurs, dans lesquels il se produit une impulsion à chaque révolution du volant; c'est l'équivalent d'une machine à vapeur à simple effet. Pour obtenir ce résultat, on peut employer divers procédés; l'un d'eux consiste à condenser, dans une des courses du piston, trois des phases du cycle à quatre temps, savoir : l'échappement, l'admission et la compression. C'est d'après ce principe que fonctionnaient plusieurs des moteurs exposés : le moteur Ravel, le moteur Benz et le moteur Baldwin. Nous les décrirons successivement, en commençant par le moteur Ravel, dont le mode de fonctionnement est peut-être un peu plus facile à saisir.

Le moteur Ravel est construit et exposé par la Société des moteurs à gaz français, de Paris.

La course motrice se fait dans les conditions ordinaires des machines à explosion, c'est-à-dire qu'elle comporte l'inflammation du mélange tonnant, préalablement comprimé, et la détente des gaz chauds de la combustion. La course rétrograde se divise en deux périodes :

Dans la première période, l'échappement s'ouvre à l'un des bouts du cylindre, tandis qu'à l'autre bout, le mélange tonnant est introduit en poussant devant lui les produits brûlés; pour que cette opération s'accomplisse, il est indispensable que le mélange soit introduit à une pression supérieure à la pression atmosphérique;

Dans la deuxième période, le mélange se comprime et devient prêt pour l'allumage.

La coupe ci-jointe (fig. 187) montre les organes au moyen desquels ce fonctionnement est réalisé.

La culasse *A* du cylindre est percée d'une lumière *a*, par laquelle se fait l'admission du mélange; cette admission a lieu par deux soupapes, manœuvrées par un excentrique calé sur l'arbre de couche : l'arbre de distribution distinct à vitesse réduite n'est plus ici nécessaire, attendu qu'à chaque révolution, les mêmes phases se reproduisent aux mêmes positions de la manivelle; comme la durée de l'admission est très courte, les soupapes ont été faites larges, légères, et elles sont appuyées par des ressorts sur leur siège; *B* est la soupape d'admission de l'air. La lumière *a* arrive tangentiellement au creux de culasse *A*, de manière à imprimer au mélange affluant un mouvement hélicoïdal, qui l'empêche de se diffuser trop rapidement dans les produits brûlés qu'il expulse devant lui. L'échappement a lieu par les trous *b*, que le piston découvre lorsqu'il arrive à fin de course; ces trous communiquent par le canal *c*, qui contourne une partie du cylindre, avec la soupape d'échappement *C* manœuvrée par l'excentrique; enfin, comme on l'a vu, il est nécessaire de comprimer l'air et le gaz, avant de les

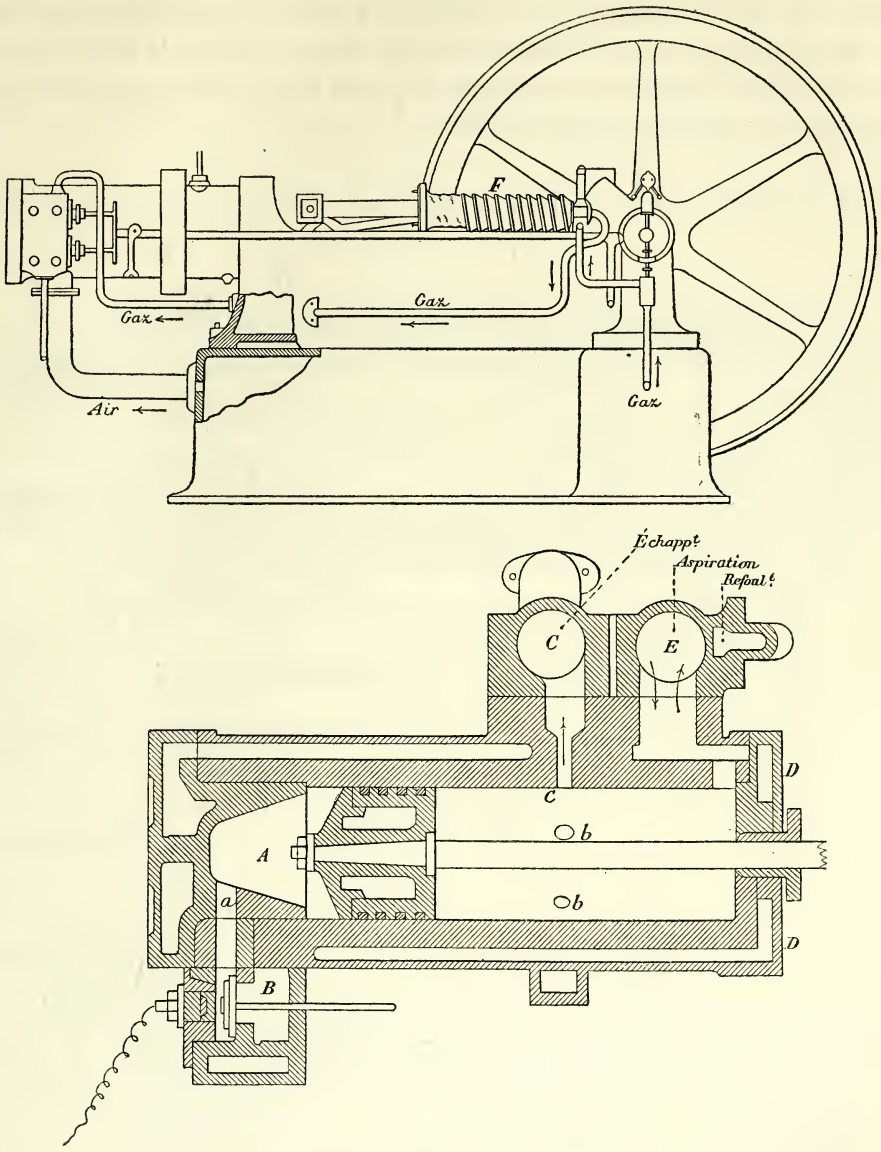


Fig. 187. — Moteur à gaz Ravel.

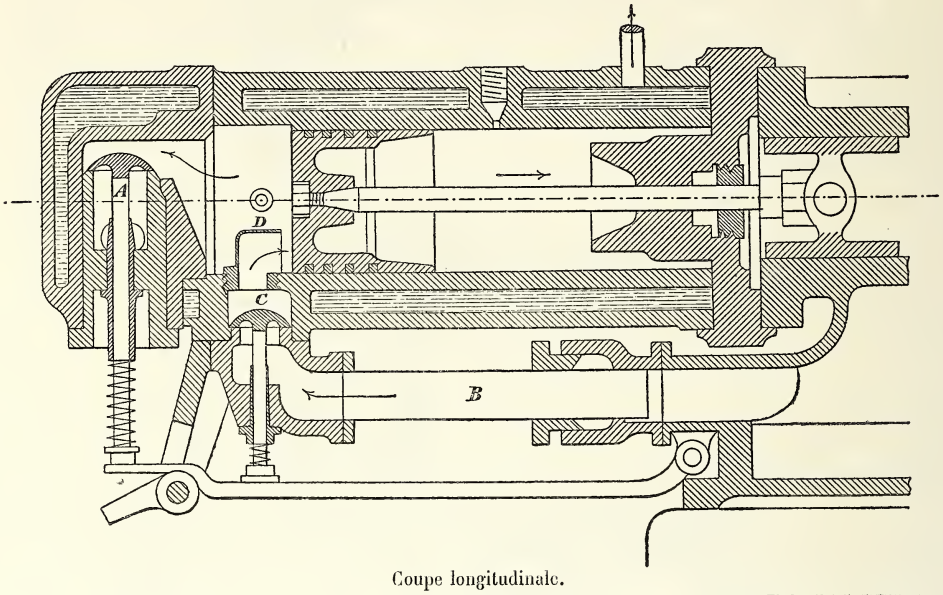
introduire dans le cylindre. Dans la machine que nous étudions, cette compression préalable est d'environ 1/4 à 1/5 d'atmosphère. La compression de l'air est produite par la face avant du piston; à cet effet, la partie antérieure du cylindre est fermée par un fond *DD*, que la tige du piston traverse à l'aide d'un presse-étoupe; l'air, aspiré par la soupape *E*, est refoulé dans un réservoir constitué par le socle en fonte de la machine. Quant au gaz, il est aspiré par une petite pompe *F*, mue par le piston, et refoulé dans un réservoir spécial, également disposé dans le socle.

L'inflammation est électrique; la régulation est obtenue par un pendule conique, supprimant l'arrivée du gaz en cas d'excès de vitesse.

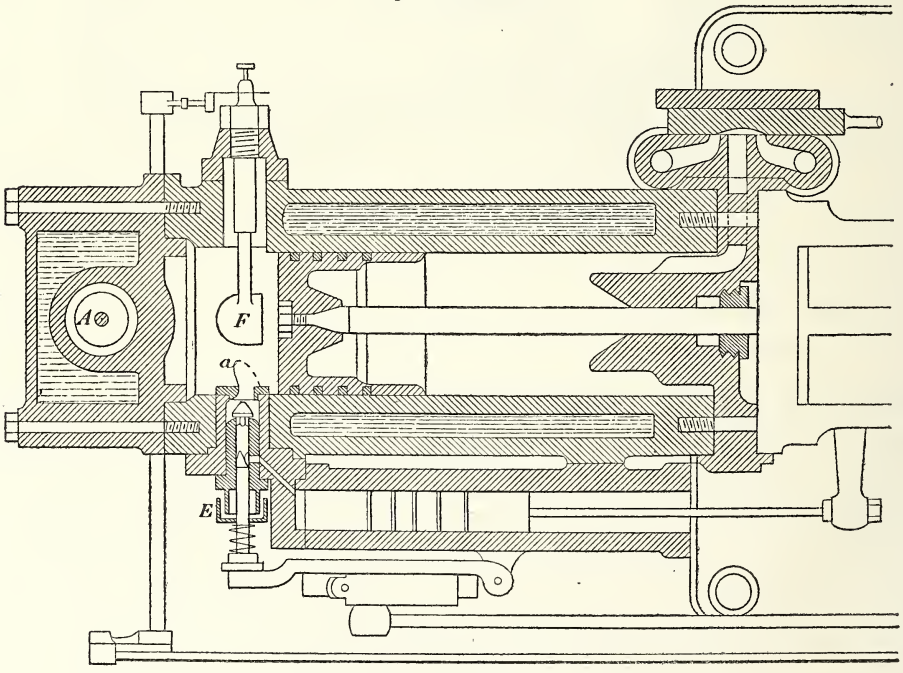
IMPRIMERIE NATIONALE.

L'allure du moteur Ravel est fort régulière; en chargeant convenablement le pendule conique, on peut faire varier beaucoup la vitesse et même la ralentir bien au-dessous des limites imposées aux moteurs à quatre temps; l'agencement des organes et l'aspect de la machine sont satisfaisants.

Le moteur Benz (fig. 188), exposé par M. Roger, de Paris, ressemble par plus d'un



Coupe longitudinale.



Coupe horizontale.

Fig. 188. — Moteur à gaz, système Benz.

point à celui de M. Ravel; le cylindre est fermé par un couvercle, et la face avant du piston agit à la façon d'une pompe, pour aspirer l'air extérieur et le refouler dans le socle de la machine; le gaz est également comprimé par une petite pompe spéciale. Toutefois, le mode de fonctionnement est un peu différent. La soupape d'échappement *A* est placée tout à l'arrière du cylindre; l'air comprimé arrive, par le large tube *B*, à la soupape automatique *C*; lorsque, à la fin de la course motrice, le piston arrive au point mort, la soupape d'échappement *A* se soulève pendant un temps très court, mais qui est suffisant pour faire tomber la pression et en même temps pour permettre à l'air comprimé de soulever la soupape *C* et de chasser hors du cylindre la plus grande partie des produits de la combustion; cette chasse est favorisée par l'ajutage *D*, qui dirige le courant d'air vers l'avant. Puis la soupape d'échappement s'abaisse et ferme l'issue à la masse gazeuse existant dans le cylindre; la soupape automatique *C* se referme donc à son tour et le piston continue la compression. A ce moment s'ouvre l'admission du gaz combustible, refoulé par la soupape *E*; ce gaz est réparti dans le cylindre par le diffuseur *a*. Lorsque la compression est terminée, les produits brûlés occupent principalement le fond de la culasse, aux environs de la soupape d'échappement *A*, tandis que la masse en contact avec la surface du cylindre est constituée par un mélange riche, qui remplit également la capsule *F*; à ce moment éclate dans cette capsule une étincelle d'induction, qui met le feu au mélange riche.

Cette machine marche à une allure relativement lente, 120 à 140 tours par minute, nécessaire pour laisser aux opérations successives le temps de s'effectuer. Elle a eu un véritable succès en Allemagne et en Amérique. En France, le brevet est concédé à M. Roger et la construction confiée aux soins de MM. Panhard et Levassor.

MM. Otis frères, de New-York, les constructeurs de l'un des ascenseurs de la tour Eiffel, présentaient dans leur exposition une machine à gaz d'un aspect assez insolite; les organes de distribution qui, dans les moteurs ordinaires, sont si encombrants, se trouvent réduits à très peu de chose et ne sont pas visibles de l'extérieur; la machine a l'apparence d'une machine à vapeur sans distribution, de sorte que le mode de fonctionnement, au premier abord, ne laisse pas que d'être énigmatique. M. Baldwin, l'auteur de cette machine, s'est laissé guider par les considérations ci-après : dans une machine à gaz ordinaire, l'aspiration et la compression du mélange peuvent être opérées par des soupapes automatiques; mais il n'en est pas de même des autres fonctions, à savoir : l'échappement et l'allumage; l'échappement donne issue aux gaz alors que leur pression n'est pas nulle; l'organe d'échappement est donc nécessairement commandé par un mécanisme relié avec les organes mobiles de la machine; quant à l'allumage, comme il doit se produire à un instant précis, il exige également une transmission mécanique. Enfin l'auteur a tenu à produire une impulsion par révolution, ce qui, ainsi qu'on l'a vu précédemment, conduit à comprimer légèrement les gaz avant leur admission dans le cylindre moteur.

Fidèle aux habitudes américaines, l'auteur a donné au problème une fois posé une solution logique, sans s'en laisser détourner par des appréhensions plus ou moins fondées. Il fabrique à l'avance le mélange tonnant et le comprime avant de l'envoyer dans le cylindre. On eût pu craindre que l'inflammation ne se transmît à contretemps : les précautions voulues ont été prises pour écarter cette éventualité.

La figure 189 représente le moteur dont il s'agit. Le piston, par sa face extérieure,

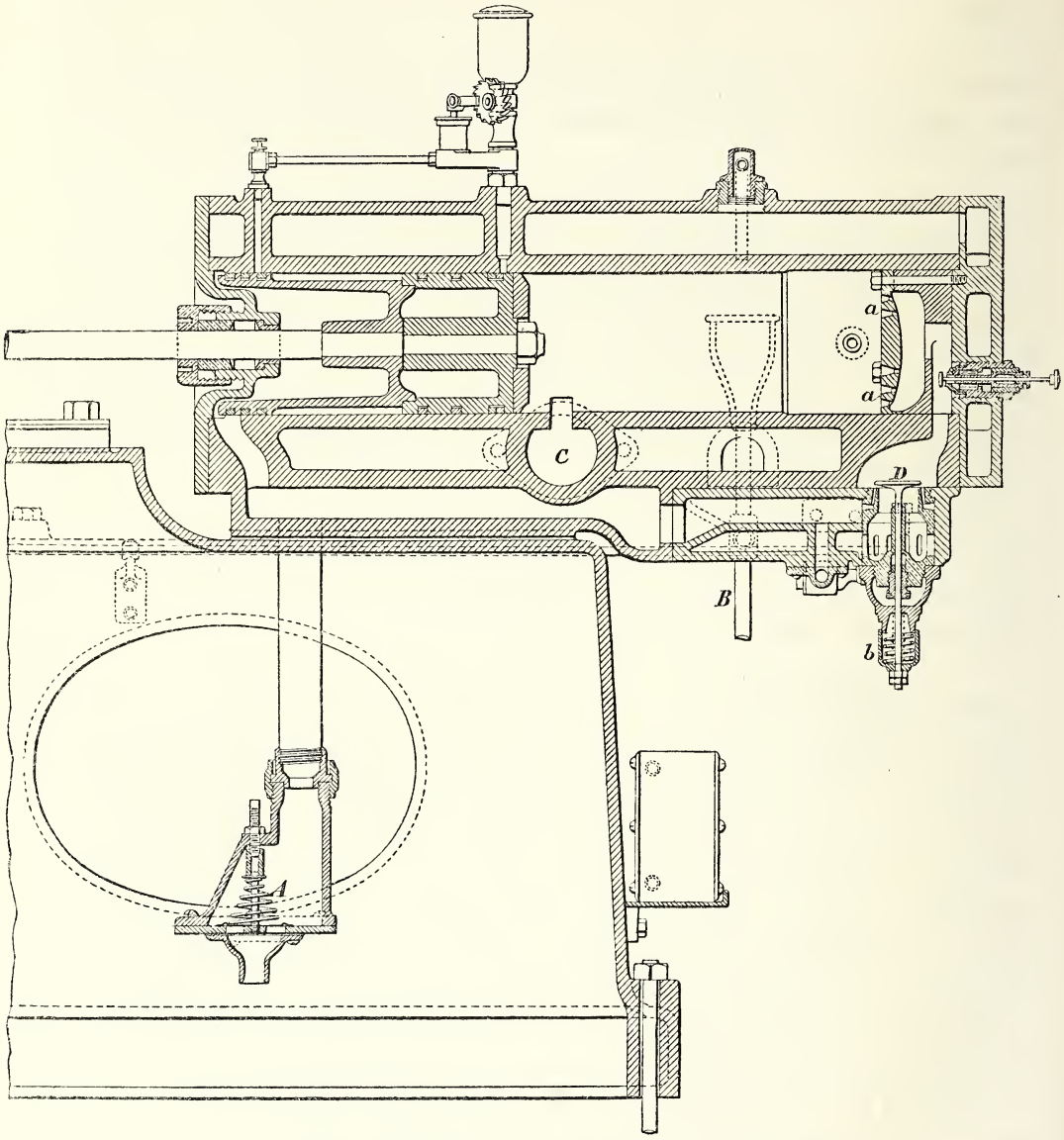


Fig. 189. — Moteur Baldwin, construit par MM. Otis frères, de New-York.

agit comme piston de pompe; il aspire l'air par la large soupape *A*, et le gaz par une soupape alimentant le canal *B*; il refoule le mélange ainsi formé dans un réservoir formé par le bâti.

L'ouverture de l'échappement se produit par le mouvement même du piston; à cet effet, le piston, arrivé vers la fin de sa course motrice, découvre la lumière *C*, pratiquée dans la paroi même du cylindre; immédiatement la pression tombe, et le mélange tonnant, soulevant la soupape à double siège *D*, s'introduit dans le cylindre, en chassant devant lui les produits brûlés; pour atténuer la diffusion rapide du mélange frais, un diaphragme *aa*, percé de trous, est dressé en avant de la culasse.

Le piston comporte deux jeux de segments, séparés par un intervalle assez long pour que la partie avant du cylindre ne soit jamais en relation avec la lumière *C*.

L'allumage est électrique; il est produit par une petite dynamo, dont la poulie reçoit, par simple contact, son mouvement de la jante du volant.

CHAPITRE VI.

MACHINES HYDRAULIQUES.

SECTION I.

MACHINES HYDRAULIQUES ÉLÉVATOIRES.

SOMMAIRE.

Généralités. — Division du chapitre et de la section.

Pompes à piston. — Dispositions.

Pompes à bras de Letestu, de Douglas, de Thirion.

Pompes à vapeur. — Pompes avec et sans volant. — Vitesses pratiquées. — Petites pompes à vapeur de Buffaud et Robatel, de Le Blanc, de Thirion. de Belleville, de Worthington. — Grandes pompes à vapeur de de Quillac et Meunier, de Worthington.

Pompes à moteurs hydrauliques de Meunier (Feray), d'Escher Wyss, de Roux (Crozet).

Pompes diverses. — Pompe à débit variable de Rousseau et Balland. — Pompe Baillet et Audemar. — Pompe monoclapet de Henry et du Marais (Prudon et Dubost).

Pompes oscillantes et rotatives. — Pompe oscillante de Sauzay. — Pompes rotatives de Douglas, de Skinner (Patent pump and blower Syndicate), de Montrichard.

Pompes à chapelet.

Pompes centrifuges. — Appold, Gwynne, Neut et Dumont. — Pompes de Dumont, de Fives-Lille, de Decoeur. — Usine de Khatatbeh, par Farcot.

Béliers hydrauliques de Bollée, de Durozoi, de Decoeur, de Douglas.

Pulsomètre de Hall (Société des Batignolles).

Dans l'intervalle qui sépare l'Exposition de 1878 de celle de 1889, l'hydraulique pratique a pris de notables développements. Ce n'est pas que, dans cet intervalle, la science de l'hydraulique ait fait des progrès bien importants. Des expériences précises ont jeté un jour nouveau sur certains phénomènes de l'écoulement des fluides; les théories ont été, sur quelques points, poussées plus avant, grâce à l'emploi ingénieux de méthodes de calcul plus parfaites. Mais, il faut en convenir, ces recherches savantes n'ont pas exercé une influence bien appréciable sur les machines industrielles, qui reposent encore aujourd'hui sur les principes généraux antérieurement admis et pratiqués.

On ne saurait dire davantage que les machines présentées à l'Exposition soient beaucoup plus parfaites que celles de l'Exposition précédente, tant au point de vue du rendement qu'au point de vue de la souplesse ou de la facilité de service. Ce n'est pas dans cette direction que l'on rencontre le progrès; il apparaît, au contraire, d'une façon évidente, si l'on examine le nombre, sans cesse croissant, des applications qui ont été faites des machines hydrauliques, et, dans certains cas, de l'ampleur exceptionnelle de ces applications.

L'Exposition de 1878 semblait marquer un temps d'arrêt dans le développement de l'hydraulique appliquée. Depuis plusieurs années, les principaux types de machines

hydrauliques paraissaient fixés d'une manière définitive, tout au moins dans leurs traits généraux et dans leurs usages industriels. Rien ne faisait prévoir des changements prochains dans cette branche de la mécanique.

Le réveil s'est produit cependant, et d'une façon aussi rapide qu'inattendue, dans toutes les parties de l'hydraulique, mais dans des proportions fort inégales.

En ce qui concerne les machines élévatoires, un grand nombre d'applications nouvelles en ont été faites, et plusieurs sur une très vaste échelle. Parmi ces applications, les unes ont pour objet l'alimentation des villes, qui, pour répondre aux exigences nouvelles de l'hygiène, s'imposent d'importants sacrifices; d'autres sont affectées au service de l'agriculture : irrigation, desséchement, etc.

De leur côté, les applications de l'eau sous pression se sont notablement étendues; l'eau comprimée sert de véhicule pour distribuer le travail dans nombre de grands ateliers, de ports, de gares de chemins de fer, etc.

Mais parmi les machines hydrauliques les plus intéressantes à étudier, celles qui ont donné lieu aux progrès les plus considérables, ce sont les machines réceptrices et, en particulier, les turbines. Ici encore, comme dans le cas des moteurs à vapeur, ce développement inattendu est produit par l'extension rapide des industries électriques. Mais la question est trop importante pour qu'il convienne de la traiter en passant; nous y reviendrons ultérieurement, pour l'étudier avec tous les détails qu'elle comporte.

Le chapitre des moteurs hydrauliques sera divisé en quatre sections :

1° Machines hydrauliques élévatoires;

2° Récepteurs hydrauliques;

3° Accumulateurs et presses hydrauliques;

4° Appareils hydrauliques divers.

Nous allons entrer immédiatement dans l'examen des machines faisant l'objet de la première section. Nous suivrons, dans cette étude, l'ordre indiqué dans la nomenclature ci-après :

Pompes à piston;
Pompes rotatives et oscillantes;
Pompes à chapelets et norias;
Pompes centrifuges;
Machines diverses, béliers, pulsomètres, etc.

Commençons par les *pompes à piston :*

La pompe à piston est restée, depuis l'antiquité, presque semblable à elle-même et composée des mêmes organes : un piston, qui parcourt un cylindre, et deux soupapes automatiques, l'une d'aspiration, l'autre de refoulement, se levant l'une et l'autre dans le sens du courant liquide qui traverse l'appareil. Chacun de ces organes a reçu des dispositions très diverses, suivant les usages auxquels est destinée la pompe, suivant

aussi les idées du constructeur et les moyens dont il dispose. Parmi les circonstances qui ont la plus grande influence, il faut citer en premier lieu la hauteur d'élévation du liquide et l'importance du débit.

Lorsque la hauteur d'élévation est faible, le piston a généralement la forme d'un disque, muni sur sa jante d'une garniture qui fait joint sur la paroi du cylindre. Autrefois le cylindre et le piston étaient souvent en bois; aujourd'hui on les fait presque toujours en métal. La garniture, qui n'a pas besoin d'être absolument étanche, est faite tout simplement à cru, ou bien constituée par des matières élastiques ou filamenteuses : chanvre, cuir, caoutchouc, etc. Les soupapes sont aussi en cuir ou en caoutchouc. Souvent aussi la garniture et les soupapes sont métalliques. D'ordinaire, ces dernières sont logées dans une chambre appelée *chapelle,* disposée de manière à rendre faciles les visites et nettoyages. Quelquefois, dans les petits appareils surtout, la soupape de refoulement est installée dans le corps du piston, percé, à cet effet, d'un canal qui le traverse.

Lorsque la hauteur de refoulement est grande, le piston prend ordinairement la forme d'un plongeur, c'est-à-dire d'une tige pleine passant dans une garniture pratiquée sur le pourtour de la tête du cylindre. Cette garniture, qui doit résister à de fortes pressions sans cesser d'être étanche, est ainsi plus accessible aux visites et plus facile à réparer; elle est constituée, soit par un presse-étoupe, soit par un cuir embouti. Dans le cas que nous examinons, les soupapes sont presque toujours en métal.

Autour du piston plongeur, entre lui et le cylindre, règne un espace d'un volume assez grand; cet espace se remplit des gaz dégagés de l'eau, et, par ce fait, le jeu de l'aspiration est interrompu; il en résulte que, pour les hauteurs d'élévation un peu fortes, la pompe doit être placée au bas de la colonne ascensionnelle, assez près du niveau de l'eau dans le réservoir inférieur, ou même au-dessous de ce niveau. C'est la conséquence du mode de construction de ces sortes de pompes.

Tant qu'il ne s'agit que de pompes mues à bras, on ne s'écarte guère des dispositifs très simples dont nous venons de rappeler les lignes essentielles. Les pompes à bras sont d'un usage courant dans l'industrie, dans l'agriculture et dans les ménages. Elles servent aux usages les plus divers. On les fabrique comme objets de vente journalière, et un grand nombre de maisons se livrent à leur construction; on arrive ainsi à fournir des pompes bien faites, rendant de fort bons services et d'un prix extrêmement réduit. Il va de soi que, d'un constructeur à l'autre, les pompes sont de qualités fort inégales. Parmi ces qualités, il en est une que l'on demande surtout à ces modestes appareils, et que malheureusement ils sont loin de posséder toujours, c'est la durabilité. Dans les localités isolées, la réparation d'une avarie arrivée à une pompe est chose longue et coûteuse, et on a quelque peine à obtenir qu'elle soit bien faite. Les bonnes maisons s'attachent avec raison à ce que les pompes qu'elles fournissent n'aient, pour ainsi dire, pas besoin d'entretien et fonctionnent longtemps sans qu'on ait à s'en occuper.

Nous pourrions citer les noms d'un grand nombre de fabricants qui avaient présenté à l'Exposition de bonnes pompes à bras; mais cette nomenclature serait sans intérêt.

On ne saurait néanmoins passer sous silence la belle exposition de M. Letestu, de Paris. Cette maison, qui a un demi-siècle d'existence, s'est consacrée à la construction des pompes, et en particulier des pompes d'épuisement. Elle a fait de cette spécialité l'objet de ses constantes études et y a apporté de nombreux et importants perfectionnements. Le point de départ de ces améliorations a été le piston Letestu. Celui-ci est constitué, comme on sait, par un cône en cuivre perforé, jouant librement dans le cylindre; sur ce cône s'applique un second cône en cuir gras, découpé sur ses bords, et qui fonctionne à la fois comme garniture de joint contre les parois du cylindre et comme soupape sur les trous du cône en cuivre. L'élasticité du cuir est assez grande pour que le cylindre n'ait pas besoin d'ajustage, ce qui a permis de le faire en tôle de cuivre. L'appareil ainsi constitué est fort léger, qualité précieuse dans beaucoup de cas. Les pompes Letestu sont employées, d'une manière générale, pour les épuisements sur les chantiers des travaux publics. Leurs excellentes dispositions ont été imitées par un grand nombre de constructeurs.

Citons encore, parmi les grands fabricants de pompes à bras, l'importante maison W. F. B. Douglas, de Middletown, Conn. (États-Unis).

La belle exposition de M. A. Thirion, de Paris, parmi plusieurs machines ingénieusement combinées, comportait une pompe intéressante par le groupement de ses organes. Dans un même cylindre vertical (fig. 190) se meuvent quatre pistons A, B, C, D; les deux pistons C et A sont fixés sur une même tige, mue par la manivelle E et passant à joint étanche à travers les pistons B et D; de même B et D sont commandés par une tige actionnée par la manivelle F; les deux manivelles E, F sont opposées. On se rend facilement compte, sur la figure, du fonctionnement de cet appareil. Il est assez simple, fort léger et très compact. Il peut être mû, soit à bras, soit par une transmission.

La plupart des pompes à bras peuvent, sans modifications essentielles, et au moyen de quelques changements dans la transmission, être actionnées par un moteur mécanique. Toutefois, la question prend un autre aspect dès que l'appareil devient un peu important. Une pompe qui débite de grands volumes diffère beaucoup des simples pompes ménagères; il faut tenir compte de conditions importantes : économie, solidité et, avant tout, écoulement facile du fluide.

Autrefois, les pompes, même de grandes dimensions, marchaient toujours à faible vitesse; par suite, leur construction n'offrait pas de difficultés spéciales. Il n'en a plus été de même lorsque l'on a été conduit à atteler sur les pompes des moteurs mécaniques à allure rapide : machines à vapeur ou turbines. Sous peine de sacrifier complètement les avantages considérables que procurent ces allures mêmes, il fallut se résoudre à

imprimer aux pistons des pompes des vitesses, sinon égales, au moins comparables à celles des pistons à vapeur.

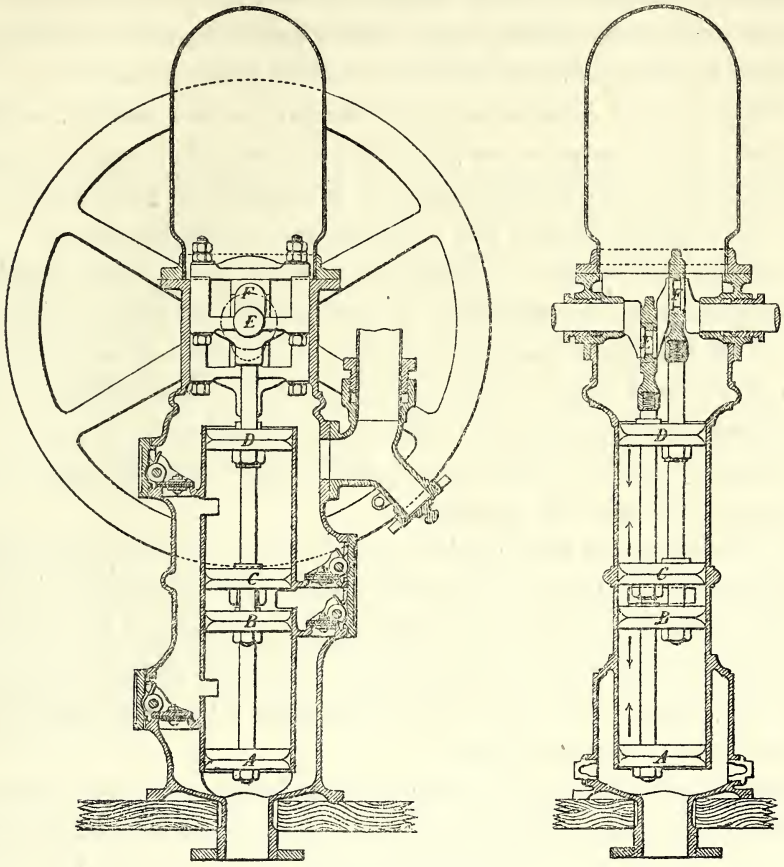


Fig. 190. — Pompe Thirion.

Le problème est fort difficile : l'eau est un liquide incompressible et de densité relativement élevée; lorsqu'elle est animée de mouvements rapides, on a à redouter, non seulement des pertes considérables de travail, mais encore des chocs violents qui détruisent les organes.

La question a été étudiée de très près par un grand nombre d'ingénieurs éminents; on ne saurait dire qu'elle soit encore entièrement résolue, mais elle a fait des progrès notables, dus en grande partie aux recherches de Girard, de Callon, de Farcot et d'autres encore.

Les procédés les plus usités pour accélérer, sans dommage, la vitesse des pistons des pompes sont les suivants :

Les conduites d'amenée et de départ sont largement calculées, et débouchent dans le corps de pompe par des orifices dessinés de manière à éviter, autant que possible, les chocs des filets fluides et les changements brusques de vitesse ou de direction.

Les soupapes sont légères, de diamètre assez grand pour que, sous une faible levée,

elles livrent passage au débit voulu. Souvent on les fait à deux ou à quatre sièges, pour développer le périmètre de contact; on se sert aussi de soupapes très petites mais très nombreuses. Suivant le principe imaginé par Girard, ces soupapes sont commandées par un ressort très flexible et peu tendu, qui les ramène doucement sur leur siège, lorsque la vitesse du piston diminue vers la fin de son excursion.

Afin d'éviter les coups de bélier, qui se produiraient, dans la conduite ascensionnelle, à chaque fermeture de soupape, on dispose des réservoirs d'air aussi près que possible des chapelles. Ces réservoirs sont montés sur la conduite de refoulement et souvent aussi sur celle d'aspiration, pour peu qu'elle ait une certaine longueur.

En ce qui concerne le piston, les garnitures sont le plus souvent métalliques. Les pistons plongeurs, si usités aujourd'hui, se meuvent dans un corps de pompe de diamètre beaucoup plus grand que le leur, renflé en forme de tonneau, et recevant l'eau par de larges orifices latéraux. L'extrémité du piston est souvent allongée en forme de cône ou d'ogive. Ces dispositions ont pour objet de transformer le mouvement longitudinal de l'organe solide en mouvement radial du fluide, dont la vitesse devient ainsi beaucoup plus petite que celle du piston.

Grâce à ces artifices, on peut imprimer aux pompes des vitesses comparables à celles qui conviennent aux machines à vapeur. Dès lors, la constitution d'une pompe à vapeur devient très simple; le corps de pompe et le cylindre à vapeur se font suite; le piston à eau et le piston à vapeur sont montés sur une même tige et leurs mouvements sont solidaires; la pression se transmet donc de la vapeur à l'eau par l'intermédiaire des deux pistons et de leur tige commune.

Cet arrangement comporte lui-même de nombreuses variétés ; il convient d'en signaler deux particulièrement importantes : le système est avec volant ou sans volant.

Dans les pompes à volant, celui-ci est monté sur un arbre actionné par le piston à vapeur. C'est une machine à vapeur du type courant, additionnée d'une pompe, qu'actionne directement la tige du piston. Toutefois, la fonction du volant revêt ici un caractère particulier : dans les machines à vapeur ordinaires, la pression de la vapeur n'agit qu'en passant par une transmission plus ou moins compliquée sur la résistance, laquelle s'applique tangentiellement à l'arbre de couche, sous forme de moment mécanique. Dans le cas actuel, il en est autrement : la résistance s'applique directement sur le piston; elle cesse ou change de sens en même temps que la pression. La fonction du volant se borne à emmagasiner le travail dû à la différence entre la pression motrice et la pression résistante augmentée des frottements.

La pression résistante est à peu près constante; il en est de même de la pression motrice, lorsque l'admission a lieu pendant toute la durée de la course. En ce cas, le rôle du volant devient secondaire; cet organe n'a plus guère pour objet que d'assurer le passage des points morts. Mais toutes les fois qu'intervient la question d'économie dans la consommation de vapeur, la marche à détente devient nécessaire; alors des

inégalités se produisent entre la puissance motrice et la puissance résistante, et c'est au volant à les compenser. La prépondérance du travail moteur est maximum au commencement de la course; puis elle décroît progressivement, s'annule aux environs de la mi-course, et finalement, c'est la pression résistante qui l'emporte. Ces conditions sont absolument différentes de celles que l'on rencontre dans le fonctionnement des moteurs à vapeur ordinaires.

Dans les pompes sans volant, les vitesses sont toujours petites. Le piston à eau et le piston à vapeur sont attelés sur une même tige, mais l'arbre à manivelle et toute la transmission qui le commande se trouvent supprimés. Il en résulte une grande simplification dans les organes et une forte diminution dans l'emplacement occupé; mais ces avantages sont rachetés par divers inconvénients inhérents au système. En premier lieu, la course n'est pas mécaniquement limitée, comme elle l'est dans les pompes à volant; il faut recourir à des moyens particuliers pour amortir la vitesse en fin de course et éviter que les pistons ne viennent heurter les fonds des cylindres. En second lieu, on ne dispose plus des facilités que procure un arbre tournant pour actionner les organes distributeurs de la vapeur; la commande desmodromique de la distribution n'est pas applicable. Enfin, et ce point est important, comme les masses en mouvement ont peu de poids et des vitesses très modérées, il faut qu'il y ait à chaque instant égalité presque absolue entre la puissance et la résistance; c'est-à-dire qu'on ne peut marcher à détente qu'en recourant à certains artifices particuliers, dont nous verrons des exemples intéressants.

Ces généralités exposées, nous allons étudier quelques-unes des pompes à vapeur qui figuraient à l'Exposition. On peut les diviser en deux catégories, d'après leur puissance. Cette division est assez naturelle, car la question de l'économie de vapeur, qui joue un rôle si capital dans les grands appareils élévatoires, devient tout à fait secondaire et disparaît même, le plus souvent, lorsqu'il s'agit de petites machines.

Les petites pompes à vapeur sont très répandues dans l'industrie et servent à un grand nombre d'usages : alimentation des chaudières, service des presses et accumulateurs hydrauliques, extinction des incendies, etc. Ordinairement, la pression de refoulement est assez forte. Le plus souvent, la vapeur agit avec peu ou point de détente, et sans condensation. On cherche à donner à ces petits appareils une marche sûre, régulière et à l'abri d'accidents; l'économie dans la consommation de vapeur est le plus souvent sacrifiée. On les fait, soit avec volant, soit sans volant.

Les petites pompes avec volant reçoivent des dispositions très variées, qu'il serait superflu d'étudier en détail. Nous en donnerons seulement quelques exemples.

La figure 191 représente le petit cheval alimentaire construit par MM. Buffaud et Robatel, de Lyon. Le piston à vapeur A, attelé sur l'arbre à manivelle B, agit, au moyen de sa tige prolongée en arrière, sur le piston à eau C; la figure montre la disposition

des clapets en bronze *a*, *a*, *a*, *a*, et de la cloche en fonte *DD*, qui régularise le débit au refoulement.

Souvent aussi, au lieu de la transmission par bielle, on communique le mouvement

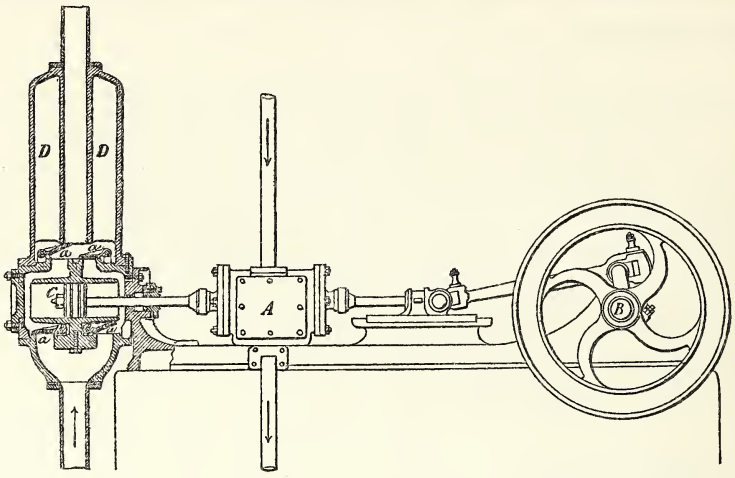


Fig. 191. — Pompe à vapeur Buffaud et Robatel.

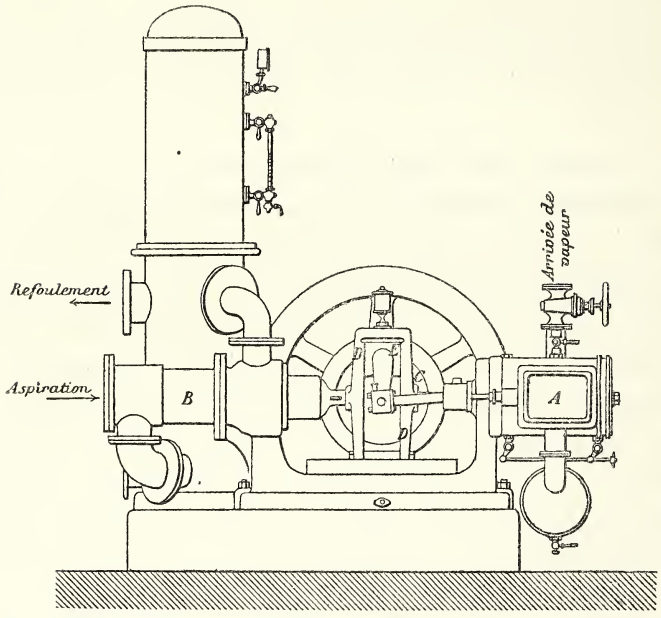


Fig. 192. — Pompe à vapeur Leblanc.

à l'arbre de couche au moyen d'une coulisse montée transversalement à la tige commune des deux pistons; la figure 192 représente un spécimen de ce dispositif, emprunté à l'exposition de M. J. Le Blanc, de Paris. Le cylindre à vapeur *A* et le cylindre à eau *B*, montés dans le prolongement l'un de l'autre, comprennent entre eux l'arbre

à volant C; les tiges des deux pistons sont réunies par une coulisse DD, parcourue par un coulisseau E articulé sur la manivelle. L'ensemble est simple et compact. Cette transmission par coulisse, qui serait fort défectueuse dans le cas d'une machine à vapeur ordinaire, à cause des frottements qu'elle engendrerait, est ici bien mieux à sa place. M. Le Blanc présente des pompes à vapeur du même style, accouplées deux par deux, avec cylindres à vapeur inégaux, en vue du fonctionnement compound.

A propos des pompes à bras, nous avons eu l'occasion de citer le nom de M. A. Thirion, de Paris. Le même constructeur présente plusieurs pompes à vapeur ingénieusement conçues et fort bien établies. Celle que représente la figure 193 ne diffère pas sensiblement, comme dispositions générales, de la pompe qui vient d'être décrite. Comme cette dernière, elle comporte un piston à eau et un piston à vapeur, réunis par une tige commune, sur laquelle est montée une coulisse actionnant la manivelle de l'arbre du volant. Deux machines semblables sont accolées et agissent sur les vilebrequins rectangulaires d'un même arbre. Ce qui distingue cet appareil, c'est un modérateur hydraulique, qui a pour objet d'empêcher que la machine ne s'emporte en cas de désamorcement. Sur les fonds des cylindres sont montés des robinets A, B, C, D, percés de très petites ouvertures, et qui communiquent, par la conduite EE, avec le modérateur F. Comme l'une des faces de chaque piston est à l'aspiration, tandis que l'autre est au refoulement, la pression qui règne dans la conduite est toujours intermédiaire entre la pression à l'aspiration et celle au refoulement.

Le modérateur F se compose de deux pistons opposés G et H, montés sur une tige commune; G reçoit la pression de la conduite EE; H, de plus petit diamètre, est en communication avec la cloche de refoulement K; les diamètres des deux pistons antagonistes sont calculés de telle sorte, qu'en fonctionnement normal il y ait équilibre. Si, à un moment donné et pour une cause quelconque, abaissement de l'eau dans la bâche d'aspiration, fuite dans la colonne, etc., le désamorcement se produit, la pompe aspirera de l'air au lieu d'eau. Par suite, la pression tombera brusquement dans la conduite EE, et le système des deux pistons G, H s'abaissera. Ce mouvement est transmis, par des leviers, au papillon L, disposé sur la conduite d'amenée de vapeur et en détermine la fermeture.

La suppression de l'arbre du volant et de son attirail procure une grande simplicité à l'agencement des pompes à vapeur, et diminue notablement leur encombrement. Aussi ce dispositif est-il souvent employé, principalement pour les petits appareils dont nous avons maintenant à faire l'étude.

Ces machines se composent de deux pistons, l'un à eau, l'autre à vapeur, montés sur une même tige et qui se meuvent dans deux cylindres placés dans le prolongement l'un de l'autre. La vitesse est faible, afin que le mouvement puisse être amorti rapidement en fin de course; le système mobile ne comporte que les deux pistons et leur tige, dont la masse est fort petite. Il en résulte que la force vive mise en jeu est presque

négligeable et qu'il y a, par suite, égalité entre la puissance et la résistance. Or cette dernière, due à la pression de l'eau et aux frottements, est à peu près constante; il doit donc en être de même de la puissance, due à la pression de la vapeur. Donc ces

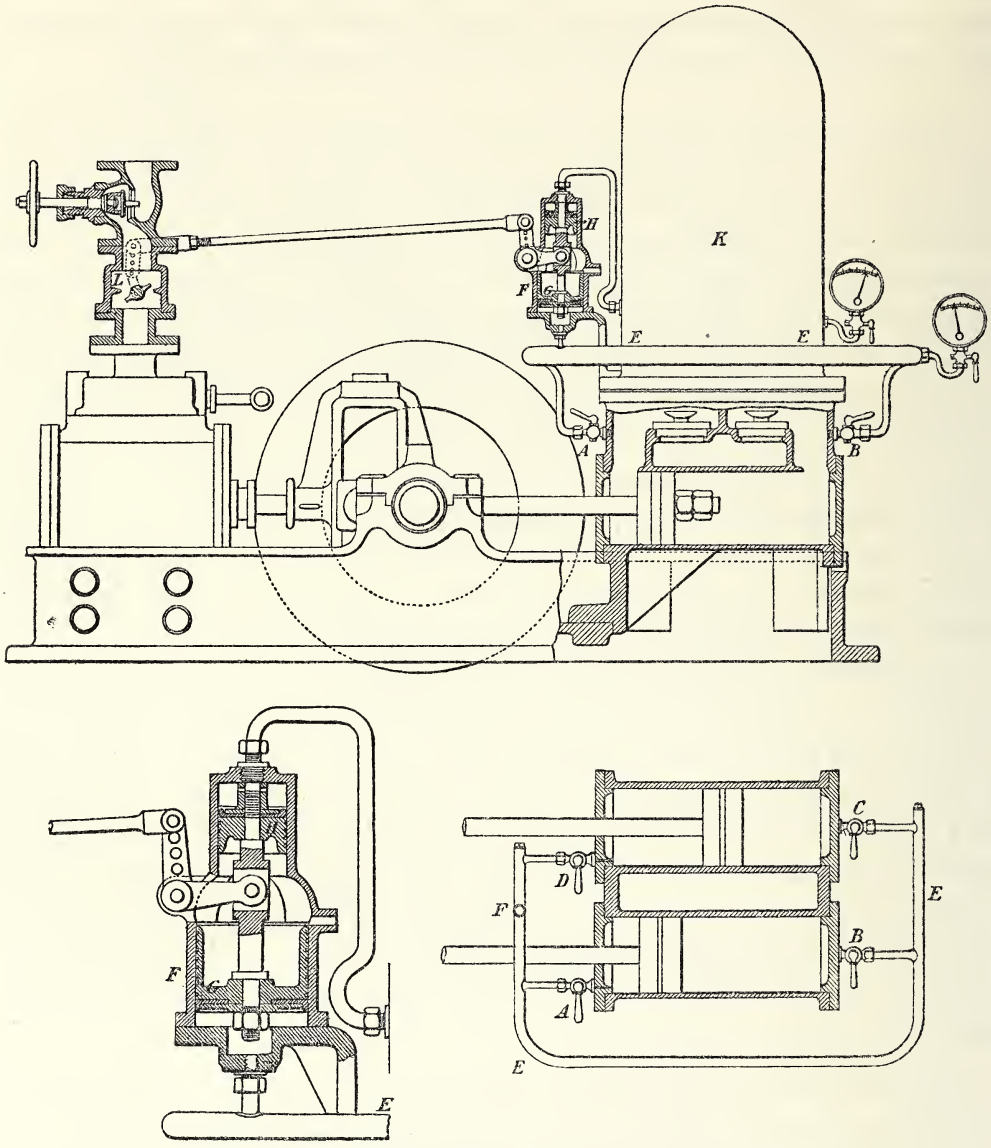


Fig. 193.

pompes marchent sans détente; d'ailleurs cet inconvénient n'est pas grave, eu égard au peu d'importance du travail à développer. S'il s'agit de petits chevaux alimentaires, on peut, dans beaucoup de cas, se servir de la vapeur d'échappement pour réchauffer l'eau d'alimentation, auquel cas la perte de chaleur se trouve supprimée.

La distribution de vapeur est à repos : la tige commune porte un doigt, qui, vers

la fin de la course, vient en contact avec un levier, lequel déplace le distributeur de vapeur.

Mais il y a là une petite difficulté, qui a causé d'assez nombreux mécomptes. Supposons, comme exemple, que le distributeur soit un tiroir en coquille. Considérons le moment où le contact du doigt commence à déplacer ce tiroir : avant que le renversement de la pression soit effectué, le tiroir prend progressivement une série de positions, parmi lesquelles il en est une où les deux lumières sont fermées; à cet instant, l'appareil, qui n'a qu'un très faible élan, est exposé à s'arrêter. Pour éviter cet arrêt, on a pris les précautions convenables afin de faire franchir le point mort. Les dispositifs adoptés à cet effet sont assez nombreux; nous allons en décrire quelques-uns.

Nous avons étudié précédemment les chaudières à petits éléments que construit la maison Belleville et Cie, de Saint-Denis (Seine). Les petits chevaux qui alimentent ces chaudières sont des pompes à vapeur fort ingénieusement établies. Le piston à vapeur a un diamètre plus grand que le piston à eau, de sorte que la pression au refoulement est plus forte que la pression dans la chaudière. Mais, sur la conduite de refoulement, existe un étranglement formant frein hydraulique; cet étranglement est constitué par une soupape commandée par un flotteur, qui se maintient à la hauteur de l'eau dans la chaudière. Lorsque le niveau de l'eau monte, le flotteur s'élève en même temps, l'étranglement se serre et le mouvement de la pompe se ralentit.

Dans ces appareils, le passage des points morts est obtenu par un artifice ingénieux : le piston de la pompe, arrivé près de la fin de sa course, soulève un clapet qui fait communiquer avec l'aspiration la partie du cylindre vers laquelle se produit le mouvement. La pression résistante tombe immédiatement, et, par la puissance élastique de la vapeur contenue dans le cylindre, le système des deux pistons est projeté en avant; ce mouvement détermine le renversement de la distribution.

Un autre procédé a été assez souvent employé pour le même objet. Le mouvement

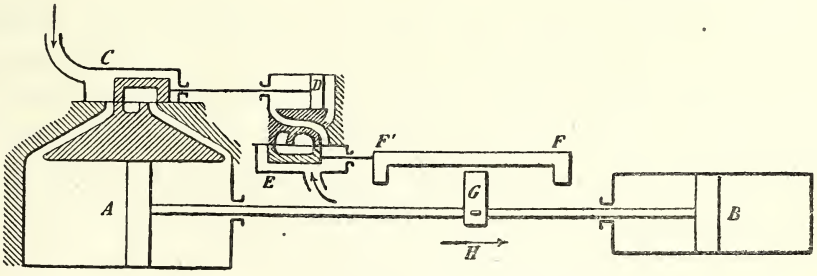


Fig. 194. — Pompe à vapeur sans volant.

du distributeur est obtenu, non plus par une transmission mécanique, mais à l'aide d'un moteur intermédiaire.

La figure 194, qui est purement schématique, représente ce dispositif : *A* est le piston

IMPRIMERIE NATIONALE.

à vapeur, *B* le piston à eau; la distribution en *A* est faite par le tiroir *C*. Ce tiroir est lui-même manœuvré par un petit piston à vapeur *D*, qui est pourvu d'une distribution spéciale *E*; sur la figure, cette distribution est à lumières croisées, pour des motifs qu'on verra ci-dessous. Le tiroir *E* est manœuvré par la règle *FF'*, laquelle porte à ses extrémités deux tocs, qui reçoivent successivement le contact du doigt *G*, monté sur la tige commune aux deux pistons.

Sur la figure, le système des deux pistons marche vers la droite (flèche *H*). Dans ce mouvement, quand le doigt *G* viendra au contact du toc *F*, le tiroir *E* se déplacera vers la droite, la distribution sera renversée sur le piston *D*, qui repoussera le tiroir *C* vers la gauche, et le mouvement rétrograde s'ensuivra. On voit de suite que grâce à l'interposition du moteur intermédiaire *D*, tout arrêt au point mort est rendu impossible.

On a construit un grand nombre de pompes à vapeur sans volant sur ce principe. Le mode d'application peut d'ailleurs être varié de bien des manières : ainsi, on peut abandonner la commande à repos, obtenue ici par le contact du doigt *G* avec les tocs *F* et *F'*, et la remplacer par d'autres dispositifs. Dans plusieurs de ces machines, entre la tige commune des pistons et le tiroir auxiliaire *E* existe une transmission desmodromique.

Imaginons que l'on agrandisse le cylindre auxiliaire *D*, pour lui donner des dimensions égales à celles de *A*; attelons sur ce cylindre *D* une pompe égale à *B*; nous aurons constitué un système de deux pompes conjuguées, lequel jouira de propriétés intéressantes.

Il existe un grand nombre de pompes à vapeur disposées suivant ces lignes générales. Nous décrirons seulement les machines étudiées par M. Worthington, et qui sont exécutées par différents constructeurs en France et à l'étranger.

Ce système de pompe est représenté par la figure 195. *A* et *A'* sont les deux cylindres à vapeur, *B* et *B'* les cylindres à eau. La tige *C* commande le tiroir renfermé dans la boîte à vapeur *D'*, au moyen de la transmission desmodromique *CEF'*; la tige commune à *A'* et *B'* commande le tiroir contenu dans la boîte *D* à l'aide de la transmission *G'GF*. Il est à remarquer que quand l'un des pistons, *A* par exemple, est à mi-course, le tiroir *D'* étant également à mi-course ferme les deux lumières d'admission de la glace sur laquelle il circule. Donc à ce moment le piston *A'* est arrêté, et réciproquement. En analysant le jeu des deux distributions entre-croisées, on s'explique facilement le fonctionnement de l'appareil : chaque piston s'arrête à fond de course, pendant un temps plus ou moins long, qui dépend des recouvrements des tiroirs; puis il repart en sens inverse, lentement d'abord, et ensuite avec une vitesse croissante; au moment où il va arriver au bout de son excursion, son mouvement se ralentit, et il s'arrête. Pendant ce temps, le second piston a suivi une marche parallèle, mais en restant en retard d'une demi-oscillation sur le premier.

Nous retrouverons le nom de Worthington en étudiant des appareils beaucoup plus importants.

L'emploi de deux cylindres accouplés conduit à un autre procédé pour franchir les points morts, sans recourir à un volant. Ce procédé consiste à atteler les deux pistons sur deux manivelles croisées, montées sur un même arbre dépourvu de volant. Le moment moteur n'étant jamais nul, il n'y a pas de point mort.

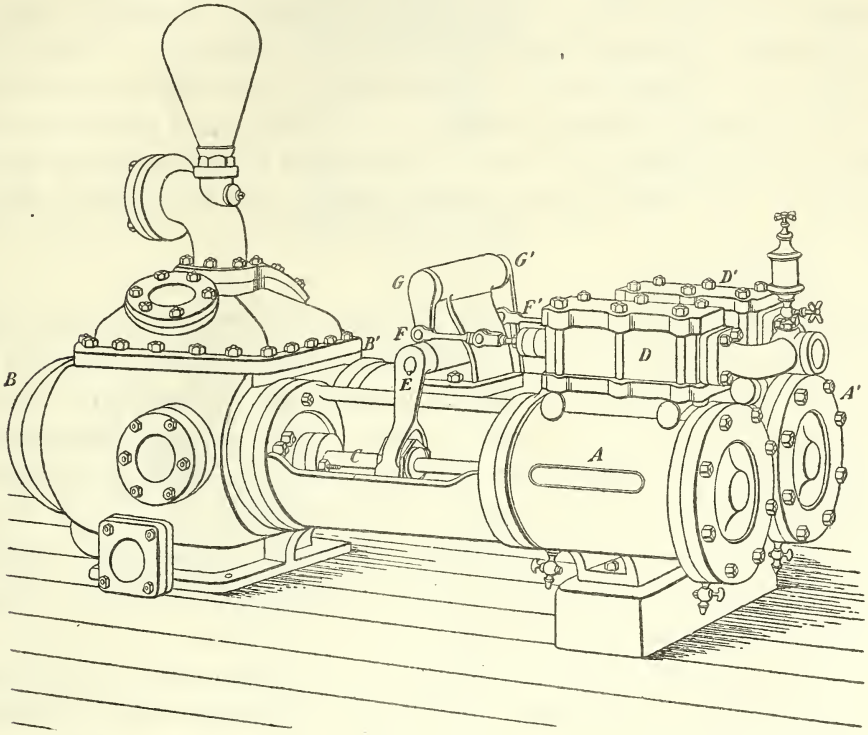


Fig. 195. — Pompe Worthington.

M. A. Thirion, de Paris, emploie ce système dans ses pompes à vapeur pour incendie, appareils remarquablement établis et qui ont remporté de très légitimes succès. Souvent même M. Thirion accouple trois pistons, à 120 degrés, sur un même arbre, ce qui donne au jet beaucoup de régularité.

Nous arrivons maintenant aux pompes à piston de grande puissance.

De même que les petits appareils élévatoires, ces grandes machines se construisent, soit avec un volant, soit sans volant. Les deux systèmes se partagent les préférences, et, sans sortir de l'enceinte de l'Exposition, nous trouvons l'un et l'autre dispositif affectés au service de la distribution d'eau.

M. de Quillacq, d'Anzin, s'était associé à M. Émile Meunier, ingénieur à Paris, pour soumissionner une partie de la fourniture d'eau de l'Exposition. Ces constructeurs avaient édifié sur la berge de la Seine une fort belle usine. Le volume d'eau à débiter était de 220 litres par seconde et la hauteur nette de 22 mètres environ; la puissance en eau montée était de 65 chevaux-vapeur.

L'appareil élévatoire (fig. 196) se compose d'une machine à vapeur horizontale qui commande directement la pompe, placée dans le prolongement du cylindre.

La machine est du système Wheelock, avec tiroirs à jalousie; nous avons décrit précédemment ce type de machines et nous n'y reviendrons pas.

La pompe est à double effet, à piston plongeur du système Girard : les deux plongeurs se font suite et circulent dans des corps de pompe fort larges, en forme de tonneau. Les clapets sont également du système Girard, c'est-à-dire appuyés sur leurs sièges par des ressorts extérieurs; ces derniers, très légers, sont à pincettes; le clapet lui-même est à deux sièges. On a ménagé, à l'aspiration et au refoulement, de grands réservoirs d'air, qui communiquent avec les chapelles par des conduites larges et courtes.

A côté de l'usine élévatoire de Quillacq et Meunier était installée une autre usine de même puissance, mais d'un système très différent. Cette usine était construite et exploitée par M. Thomas Powell, de Rouen. La pompe, au lieu d'être munie d'un arbre à manivelle avec volant, n'avait ni arbre ni volant; c'était une pompe Worthington.

Avant de décrire cette remarquable machine, il n'est pas inutile de revenir sur la question du volant, dans ses applications aux pompes à vapeur.

L'emploi du volant assure, avons-nous dit, deux avantages principaux : d'abord la course se trouve rigoureusement limitée, ensuite on peut travailler à détente, c'est-à-dire dans de bonnes conditions économiques.

Mais ces avantages sont rachetés par certains inconvénients. Sans parler de la complication plus grande du mécanisme, on remarque, en premier lieu, que la liaison desmodromique entre la tige et l'arbre à manivelle entraîne, comme conséquence, de grandes variations dans la vitesse du piston de pompe. Ces variations s'accordent mal avec le régime de la conduite ascensionnelle, qui, au contraire, doit rester aussi uniforme que possible. Pour atténuer ces discordances, on est obligé de monter, près des chapelles, de vastes réservoirs d'air, formant ressort, et d'entretenir toujours complet le volume d'air qu'ils renferment.

Si quelque variation tend à se produire dans le débit de la conduite, la machine doit pouvoir modifier sa vitesse en conséquence. La masse du volant intervient alors d'une manière fâcheuse, car elle empêche l'allure de la machine de s'accommoder immédiatement à ces variations, d'où production, dans les organes, de réactions destructives. Enfin, lorsque la vitesse de la machine est faible, le volant devient énorme.

Il ne sera pas hors de propos de rappeler ici que les plus anciennes machines à vapeur, travaillant à détente, actionnaient des pompes sans l'intermédiaire de manivelle ni de volant. Nous voulons parler des machines d'épuisement des mines de Cornouailles. Mais dans ces machines, qui du reste étaient à simple effet, intervenait un organe à mouvement variable, qui se comportait comme un volant de grande puissance : c'était la maîtresse tige, sur laquelle était prise la commande des pompes. Cette tige était

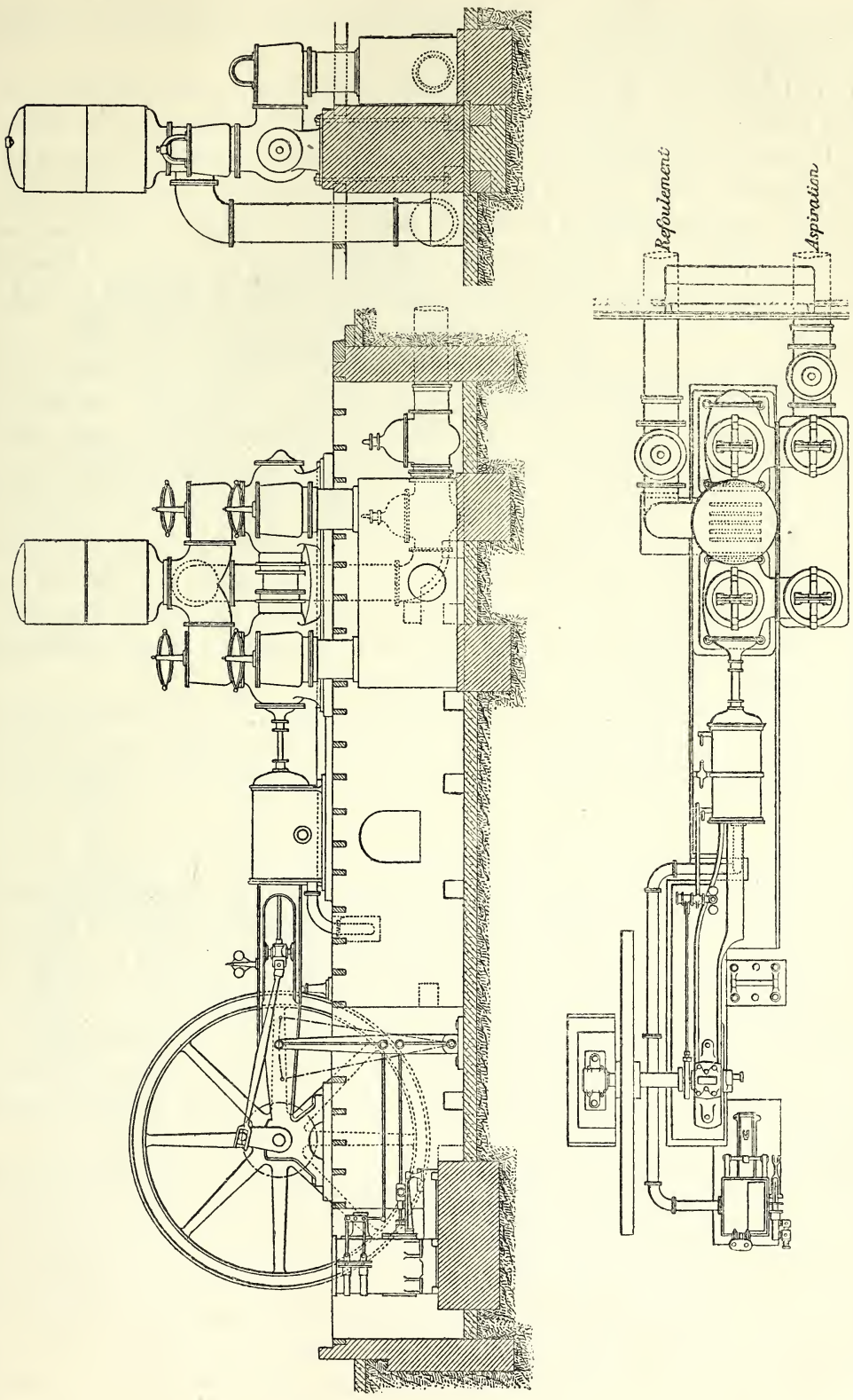


Fig. 196. — Pompes de Quillacq et Meunier.

animée de vitesses assez petites, mais sa masse était énorme, attendu qu'elle occupait toute la hauteur du puits de mine.

M. Worthington s'est donné pour but d'établir une machine à vapeur élévatoire, travaillant à détente, sans l'intervention d'aucun volant ni de masses pesantes en mouvement. Il y est parvenu par des procédés d'une ingéniosité et d'une efficacité remarquables. C'est un nouvel exemple de cette faculté spéciale, que possèdent les ingénieurs américains, de poser les problèmes mécaniques avec netteté et précision, d'en tirer des solutions logiques, et de mettre audacieusement ces solutions en pratique, si bizarres qu'elles paraissent, sans se laisser arrêter ni par les idées reçues, ni par les habitudes ayant cours.

Nous avons décrit, précédemment, la petite machine élévatoire de Worthington, à deux pistons à vapeur et sans détente. Sa marche est digne d'attention : l'un des pistons (appelons-le *A*) étant immobile et à fond de course, l'autre *B* est en mouvement; quand *B* approche de la fin de son excursion, *A* part tout doucement, puis sa vitesse s'accroît; et elle prend sa valeur maximum au moment où *B* s'arrête et s'immobilise à son tour. Les variations de vitesse de l'un et l'autre piston sont lentes et progressives, et les repos en fin de course sont prolongés. Les organes mobiles interviennent fort peu par leurs masses, et les forces agissant sur les organes se font presque rigoureusement équilibre. Ce système s'adapte donc très bien à l'élévation des eaux, opération qui exige une grande douceur dans tous les mouvements.

Il était, de plus, important de douer cette machine d'une autre propriété, l'économie dans la dépense de vapeur, qui fait absolument défaut lorsque le piston fonctionne sans détente. M. Worthington a obtenu ce résultat par un dispositif aussi simple qu'ingénieux.

La figure 197 représente une machine élévatoire du type Worthington, disposée de façon à fonctionner en compound à grande détente. *A* et *A'* sont les deux corps de pompe à eau; *B* et *C* sont deux cylindres à vapeur disposés en tandem; sur le dessin en perspective, la deuxième paire de cylindres à vapeur, commandant la pompe *A'*, est en arrière de *B* et *C*. La distribution est faite par les tiroirs compensés *D*, *E*, le tiroir *E* recevant directement la vapeur vive, le tiroir *D* prenant sa vapeur dans le receiver *F* commun aux deux groupes parallèles. Jusqu'ici tout se passe comme dans la petite pompe Worthington : l'un des groupes commande le tiroir de l'autre et réciproquement.

Mais les deux cylindres en tandem fonctionnent à détente, c'est-à-dire que la force motrice va en décroissant du commencement à la fin de la course; or la force résistante, résultant de la pression de l'eau montée sur le piston *A*, reste sensiblement constante. Ces deux pressions, l'une variable, l'autre constante, ne sauraient produire un équilibre, qui cependant est indispensable, eu égard au peu d'énergie cinétique des organes. Voici par quel artifice cette difficulté a été tournée.

Sur le prolongement de la tige de chaque pompe viennent agir deux petits pistons

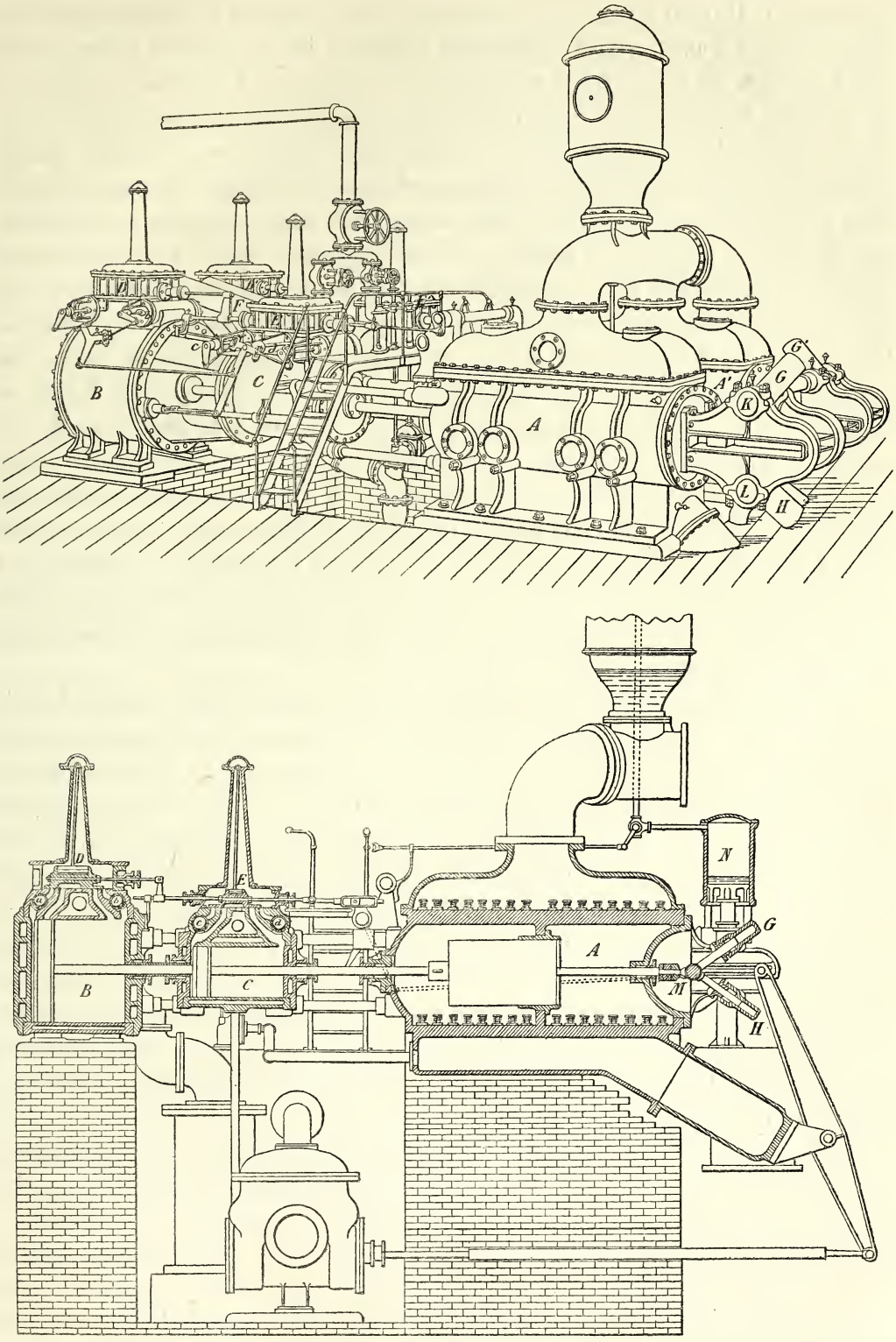


Fig. 197. — Pompe Worthington.

plongeurs *G*, *H*, dont les cylindres oscillent sur leurs tourillons *K*, *L*. Ces pistons reçoivent l'action d'une pression hydraulique constante; les composantes verticales des efforts produits par ces pistons se neutralisent; les composantes horizontales s'ajoutent sur la rotule *M*, montée sur la tige de la pompe *A*, et se composent suivant cette tige. De cette façon, leur résultante varie avec l'inclinaison des pistons, c'est-à-dire avec la position de la rotule. Partons de la position indiquée sur la figure, les pistons *A*, *B*, *C* étant à l'extrémité gauche de leur course, et suivons le système pendant une excursion vers la droite. A l'origine, les pistons *G*, *H* agissent sur la rotule *M* en retardant sa marche; les proportions étant convenablement établies, les organes mobiles sont soumis à des forces qui se font presque équilibre. A mesure que *M* s'avance vers la droite, les cylindres *G*, *H* se redressent et leur action diminue; mais en même temps, par le fait de la détente, la pression de la vapeur a diminué dans les cylindres *B* et *C*, et l'équilibre se maintient. Le système étant à mi-course, les deux pistons *G*, *H* sont verticaux, leurs actions s'accumulent, et l'équilibre subsiste entre la pression de la vapeur et celle de l'eau. Plus tard, les pistons *G*, *H* s'inclinent en sens inverse, et leur action s'ajoute à celle de la vapeur, qui faiblit de plus en plus à mesure que la détente se prolonge. L'équilibre peut être ainsi, à peu de chose près, conservé pendant la totalité de l'excursion. Quant à la pression hydraulique sur les pistons *G*, *H*, elle est donnée, soit par la colonne ascensionnelle, soit, si c'est nécessaire, par un multiplicateur de pression, qui est figuré en *N*.

La détente est opérée par quatre tiroirs tournants, genre Corliss, *a*, *b*, *c*, *d*. Mais tandis que, pour la distribution proprement dite, chaque groupe commande le distributeur du groupe parallèle, au contraire, les distributeurs de détente de chaque cylindre sont commandés par la tige même du piston de ce cylindre, afin que la fermeture de l'admission se fasse pour une position absolument déterminée du système mobile. Cette position peut d'ailleurs être modifiée, même en marche, au moyen d'organes de rappel, qui sont représentés sur la figure en perspective.

Les résultats ainsi obtenus sont des plus remarquables : la marche est absolument tranquille et régulière; les diagrammes accusent une compensation pratiquement parfaite entre la variation des pressions de la vapeur et celle de l'action des pistons oscillants. D'après les références fournies, la consommation de vapeur, dans ces grands appareils, descendrait à 8 kilogrammes ou 8 kilogrammes et demi de vapeur par cheval-heure en eau montée.

A l'Exposition, les pompes Worthington étaient représentées par de nombreux modèles de toutes dimensions. Outre la grande usine élévatoire du quai d'Orsay, deux pompes Worthington, installées dans le pilier sud de la tour Eiffel, servaient à refouler l'eau jusque dans le réservoir disposé au sommet de la tour, pour le service des ascenseurs, sous une charge de 30 kilogrammes par centimètre carré. Un grand nombre de ces pompes desservaient l'alimentation de divers groupes de chaudières, la condensation, etc.

Ce fut en 1856 que Henry R. Worthington imagina la petite pompe, à deux corps et sans détente, que nous avons précédemment décrite. Depuis cette époque, l'appareil n'a cessé d'être perfectionné; les deux cylindres oscillants, compensateurs des variations de pression, ont été inventés par C. Worthington, le fils et le successeur de Henry. Grâce à cette invention remarquable, la pompe duplex a pu aborder, d'une façon économique, l'élévation de grandes masses d'eau. L'usage de cet appareil s'est répandu dans toutes les parties du monde. La *Worthington pumping engine Company* a des maisons à New-York, à Londres, à Paris, à Berlin, à Bruxelles. Elle a établi des pompes dans nombre de centres industriels; le volume total des eaux élevées journellement par les pompes Worthington dépasse le chiffre formidable de 1 million de mètres cubes en vingt-quatre heures, soit plus de 100 mètres cubes par seconde.

Des applications intéressantes de ces pompes ont été faites pour le refoulement du pétrole dans ces longues conduites, si usitées pour cet usage, en Amérique. A Osborne-Hollow, la machine élévatoire refoule en vingt-quatre heures 25,000 barils de pétrole, soit plus de 4 millions de litres, sous une pression de 100 kilogrammes par centimètre carré. La maison Worthington, après avoir créé et propagé le type de pompe à vapeur que nous venons de décrire, s'est attachée à le perfectionner dans tous ses détails. En jetant un coup d'œil sur la figure ci-dessus, on remarquera certains dispositifs fort ingénieusement combinés : les lumières sont doubles à chaque extrémité du cylindre : l'une d'elles sert à l'admission, l'autre à l'échappement; cette dernière est couverte à fin de course, par la garniture du piston, de manière à constituer un coussin de vapeur, qui empêche les chocs contre les fonds; les tiroirs sont équilibrés, etc.

Il résulte d'expériences dignes de foi que la consommation de vapeur, par heure, descendrait au chiffre très bas de 8 kilogrammes à 8 kil. 5, par cheval en eau montée, et à 7 kil. 3 à 7 kil. 8, par cheval indiqué. Les diagrammes relevés sur les cylindres à vapeur, combinés avec les travaux dus aux cylindres compensateurs, en tenant compte de l'obliquité de ces derniers et des dimensions des différents organes, montrent que, pendant toute la durée de la course, l'effort moteur est d'une remarquable uniformité.

A la suite des pompes mises en mouvement par des machines à vapeur, il convient de dire quelques mots des appareils élévatoires actionnés par des moteurs hydrauliques. Les applications de ce dispositif sont demeurées longtemps assez rares; elles semblent revenir en faveur, à mesure que les exigences de l'hygiène deviennent plus pressantes et que la consommation des centres habités prend plus de développement. On en voyait plusieurs exemples à l'Exposition.

MM. Féray et Cie, à Essonnes (Seine-et-Oise), exposent les appareils élévatoires qu'ils ont construits pour l'alimentation en eau de la ville de Nogent-sur-Seine; l'étude est due à M. Meunier, de Paris. L'usine comporte une turbine, du système Girard, qui commande directement deux pompes horizontales à piston plongeur. Les données caractéristiques de la machine sont les suivantes : le débit des pompes, suivant le

volume et la hauteur de chute de l'eau motrice disponible, varie dans des proportions étendues, de 12 m. c. 25 à 40 mètres cubes à l'heure. C'était là une des grandes difficultés du problème; on l'a résolue en donnant à la turbine et aux pompes une vitesse variable. La vitesse minima est de 11.9 tours par minute; la vitesse maxima est de 38 tours. La turbine a dû évidemment être établie pour s'accommoder de ce régime variable; c'est un point sur lequel nous aurons à revenir. La hauteur brute d'élévation est de 26 m. 70; mais, à la vitesse maxima, les pertes de charge majorent fortement la hauteur manométrique au départ, laquelle s'élève, dans ce cas, à 46 mètres. Les pompes ont un diamètre de 0 m. 140 et les pistons une course de 0 m. 300. Rappelons que le système appliqué ici a déjà fait ses preuves dans maintes circonstances, notamment dans les belles usines établies, par MM. Feray et Cie, pour l'alimentation du Canal de l'Est. D'ailleurs, l'installation qui nous occupe est digne en tout point, par sa conception aussi bien que par son exécution, de la vieille réputation de la maison Feray.

Parmi les nombreux exemples, que nous pourrions citer, d'élévation d'eau à l'aide de machines hydrauliques, nous nous contenterons de décrire rapidement la belle installation établie, pour l'alimentation de la Chaux-de-Fonds, par MM. Escher, Wyss et Cie, de Zurich.

La ville de la Chaux-de-Fonds, qui compte 25,000 habitants, était dépourvue d'eau potable, que l'altitude élevée de la localité (1,000 mètres au-dessus du niveau de la mer) ne semblait pas permettre d'y amener; elle s'alimentait par des puits et des citernes. A la suite de longues recherches, on décida de prendre les eaux de l'Arense comme force motrice, et de s'en servir pour élever les eaux de source captées sur le flanc gauche de la vallée. L'Arense est une petite rivière qui coule à 20 kilomètres de la Chaux-de-Fonds et à une altitude inférieure de 500 mètres à celle de la cité à alimenter.

La machinerie élévatoire a été exécutée par la maison Escher, Wyss et Cie. Les données principales du problème étaient les suivantes :

Eau motrice, hauteur nette de chute	52 mètres.
Débit (litres par seconde)	2,000 litres.
Puissance motrice disponible	1,387 chevaux.

Cette puissance a été répartie entre sept groupes élévatoires, d'une puissance brute de 198 chevaux chacun. Trois de ces groupes sont installés et fonctionnent; le quatrième est celui qui figure dans les galeries de l'Exposition.

Chaque groupe se compose d'une turbine à axe horizontal, du système Girard, et de deux pompes à double effet, commandées directement par les plateaux-manivelles montés sur l'axe de la turbine. La dépense d'eau motrice, pour chaque turbine, est de 286 litres par seconde, et la puissance est comptée pour 140 chevaux sur l'arbre.

La hauteur de refoulement est de 487 mètres; c'est cette hauteur qui constitue la

caractéristique de cette belle installation. Élever d'un seul jet, à près de 500 mètres de hauteur, un volume d'eau important, c'est là une entreprise devant laquelle on eût reculé il y a peu d'années. Aujourd'hui, ce problème étonne si peu, que sur les cinq constructeurs, suisses ou étrangers, qu'on avait appelés au concours, aucun ne mit en doute la possibilité de le résoudre.

Les pompes présentent les dimensions ci-après :

Diamètre	113 millim.
Course	500 —
Nombre moyen de révolutions par minute	56

Le volume débité par groupe de deux pompes à double effet est de 1,000 litres par minute, en comptant sur un rendement de 0.90.

La vitesse moyenne des pistons des pompes est de 0 m. 923 par seconde; ces pistons sont en forme de plongeurs et passent par un presse-étoupe; ils sont terminés en ogive. Les corps de pompes, beaucoup plus larges que les pistons, communiquent directement avec les soupapes d'aspiration et de refoulement; ces soupapes sont en bronze, avec ressorts et à deux sièges concentriques. Chacun des tuyaux d'aspiration est muni d'une crépine, d'une soupape de retenue et d'une cloche à air. Les chapelles de refoulement sont réunies par des conduites mises en communication avec un réservoir d'air commun aux quatre chapelles d'un même groupe. Ce réservoir est en acier coulé, et l'air peut y être renouvelé à l'aide d'un appareil à sas, qui fonctionne comme la bouteille alimentaire qui sert à introduire l'eau dans les chaudières à vapeur.

Cette belle installation n'a donné lieu en somme qu'à des dépenses fort modérées. La dépense totale, comprenant le captage des eaux de source, l'aménagement des eaux motrices, les usines, la canalisation d'amenée (près de 20 kilomètres) et de distribution en ville, les réservoirs, les indemnités de toute nature et les frais d'étude, n'a pas dépassé 1,800,000 francs. Dans cette somme, la partie mécanique proprement dite (trois appareils élévatoires composés chacun d'une turbine et de deux pompes à double effet) figure pour 95,000 francs seulement.

Les essais de réception ont donné lieu à des constatations fort intéressantes. Le rendement des machines élévatoires s'est élevé en moyenne à 67 p. 100; étant pris comme bases de calcul : d'une part, le débit en eau motrice et la chute manométrique mesurée aux turbines, d'autre part le débit en eau montée et la hauteur accusée par le manomètre au pied de la colonne ascensionnelle. Ce résultat est des plus remarquables et fait honneur à la maison qui a établi ces beaux mécanismes.

Ainsi que nous le disions plus haut, l'usage des moteurs hydrauliques, pour actionner des machines élévatoires, reprend faveur depuis quelques années. Dans les questions de cette nature, il existe une relation évidente entre la quantité d'eau qui, par sa chute, produit la puissance et la quantité d'eau élevée. Abstraction faite des pertes de

toute nature, dont il est tenu compte par ce qu'on appelle le *coefficient de rendement*, il est clair qu'en vertu des principes fondamentaux de la mécanique, le travail moteur est égal au travail utile. Or chacun de ces deux travaux dépend de deux facteurs, le débit et la hauteur. Il y a donc en présence quatre variables, qui ne sont reliées entre elles que par une seule relation; donc le problème est susceptible de revêtir des aspects extrêmement nombreux et variés.

Dans la plupart des applications ordinaires, la chute motrice a beaucoup moins de hauteur que l'élévation des eaux à distribuer. C'est ainsi que les choses se présentent dans les installations que nous avons étudiées jusqu'ici; mais dans certains cas il en est autrement : il faut élever, à une hauteur modérée, un grand volume d'eau, au moyen d'une chute de faible débit et de grande hauteur. C'est ce cas qui s'est présenté dans un puit des mines de Montceau (Saône-et-Loire). Les données principales étaient les suivantes :

CHUTE MOTRICE.

Hauteur	153 mètres.
Débit, par seconde	5 lit. 3
Puissance disponible, par seconde	811 kgm.
Soit	10,8 chev^x vap^r.

La hauteur à laquelle les eaux devaient être élevées était de 17 mètres.

En admettant pour la machine élévatoire un rendement de 0.62, ce qui donnait, en eau montée, un chiffre de $0.62 \times 10.8 = 6.7$ chevaux, on trouve pour le débit des eaux élevées le chiffre d'environ 30 litres par seconde.

La solution imaginée par M. Roux et exécutée par la maison Crozet et Cie, au Chambon-Feugerolles (Loire), est à la fois ingénieuse et rationnelle. La forte pression due à l'eau motrice s'exerce sur un piston, auquel elle imprime un mouvement de va-et-vient. Sur ce piston sont montés ceux de la pompe élévatoire. Jusqu'ici rien de particulier, et le même dispositif a été plus d'une fois employé. Ce qui distingue la machine que nous étudions, c'est la distribution de l'eau motrice. Elle est faite par un tiroir en forme de piston, et par conséquent équilibré. Ce tiroir est lui-même actionné par un piston hydraulique, auquel la distribution est donnée par le piston moteur lui-même. A cet effet, le cylindre actionnant le tiroir est muni de lumières, qui aboutissent à des trous percés dans le cylindre principal. Le piston moteur, dans ses excursions, ouvre et ferme successivement lesdites ouvertures et opère ainsi la distribution.

Nous avons eu déjà l'occasion, en parlant des pompes à vapeur, d'étudier des systèmes plus ou moins analogues. Ils présentent un inconvénient, c'est l'arrêt aux points morts. Cet inconvénient est fort important lorsqu'il s'agit d'un fluide élastique comme la vapeur d'eau; mais il deviendrait désastreux, et paralyserait complètement le jeu de la machine, dans le cas d'un liquide incompressible. Pour tourner cette difficulté, on

a eu recours à un artifice, qui ressemble beaucoup à l'un de ceux dont on fait usage, pour le même objet, dans les pompes à vapeur. La distribution, au cylindre qui commande le tiroir, est donnée par un petit moteur intermédiaire, lequel reçoit lui-même sa distribution du piston principal. Cette combinaison de trois moteurs forme un cycle fermé, dans lequel chaque piston fait la distribution dans le cylindre consécutif. On parvient ainsi à faire disparaître complètement les arrêts aux points morts.

La machine-pompe de M. Roux est fort bien disposée, très compacte et comporte des détails extrêmement ingénieux. Elle rend d'excellents services dans la mine où elle a été installée.

Nous terminerons cette étude des pompes à piston par la description de quelques appareils du même genre, présentant des dispositions nouvelles et intéressantes.

MM. Ph. Rousseau et F. Balland ont cherché à résoudre le problème suivant qui se présente assez souvent dans l'industrie : étant donnée une pompe actionnée par une force motrice quelconque, une transmission par exemple, faire varier le débit de cette pompe sans modifier la vitesse du moteur, et cela par un procédé simple, pratique et rapide.

L'appareil qu'ils ont imaginé à cet effet se compose (fig. 198) d'un corps de pompe A, muni de ses soupapes d'aspiration et de refoulement. Ce corps reçoit deux pistons B et B',

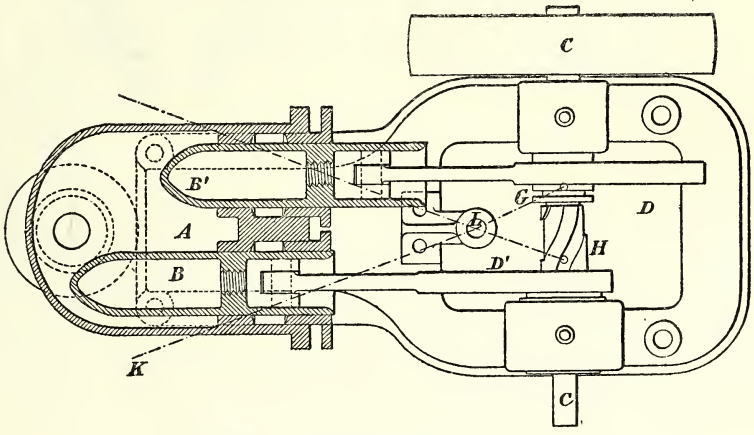


Fig. 198. — Pompe Rousseau et Balland.

actionnés par un arbre tournant CC, à l'aide des deux excentriques D et D' calés sur cet arbre. Il est évident que le débit de l'appareil dépend des positions relatives des deux centres d'excentricité. Si les deux excentriques sont parallèles, le débit du système sera égal à la somme des débits fournis par chacun des pistons; si les excentriques sont opposés, la différence de ces deux débits passera seule dans la colonne ascensionnelle. Dans ce cas, en supposant les deux pistons égaux comme course et comme diamètre, le débit de l'appareil sera nul; d'un calage à l'autre des excentriques, le débit variera d'une manière continue.

Il suffit donc, pour modifier le débit, de changer le calage relatif des excentriques. On obtient ce résultat fort simplement de la manière suivante : l'excentrique *D* est fixé sur l'arbre; l'excentrique *D'* est à calage variable. A cet effet, le manchon en bronze *H* entraîne *D'* au moyen d'un filet de vis pratiqué sur sa périphérie. Ce manchon, tout en tournant avec l'arbre *CC*, peut voyager le long de cet arbre. Ce mouvement longitudinal lui est donné par la fourchette *G*, portée par le levier *GK* qui tourne autour du point fixe *L*. Il suffit de déplacer ce levier à la main pour modifier le débit dans les plus larges limites, et cette manœuvre se fait sans arrêter l'appareil ni changer la vitesse de l'arbre. La solution est élégante et semble tout à fait pratique.

La pompe imaginée par MM. Baillet et Audemar et exposée par M. Audemar-Guyon, constructeur à Dôle (Jura), est une variante d'un dispositif plus d'une fois proposé. L'appareil (fig. 199) comporte quatre pistons enfilés deux à deux sur une même tige.

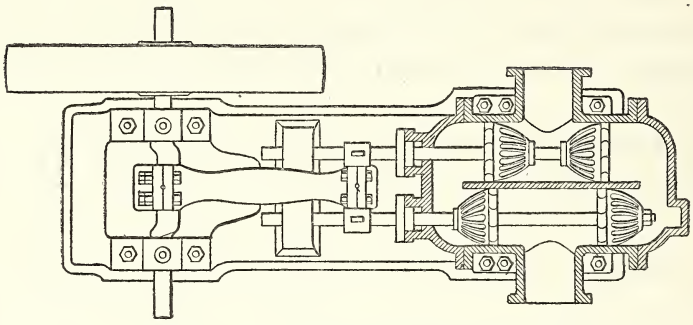


Fig. 199. — Pompe Baillet et Audemar.

Ces pistons sont en cuivre avec garniture conique en cuir, genre Letestu. Ils sont commandés tous quatre par une seule manivelle, et leurs mouvements sont toujours égaux et parallèles. Il est clair que le débit est double de celui que donnerait, avec les mêmes dimensions et la même allure, un piston unique à double effet. L'un des avantages de ce dispositif, c'est qu'il supprime entièrement les clapets, chacun des pistons fonctionnant comme soupape, tantôt à l'aspiration, tantôt au refoulement.

Lorsqu'une pompe est surmontée d'une colonne ascensionnelle un peu longue, on constate fréquemment que le débit qu'elle donne est notablement supérieur au débit théorique résultant du volume engendré par le piston. Cet écart est dû à l'inertie de l'eau en mouvement : la masse liquide ne suit pas les oscillations du piston : sa vitesse ne s'amortit pas subitement lorsque le piston arrive à fond de course, et elle continue même pendant une partie de la course rétrograde, en maintenant les clapets ouverts contre la pression.

MM. Henry et du Marais ont eu l'idée ingénieuse d'utiliser ce phénomène pour établir une pompe dans laquelle le clapet de refoulement est supprimé, et lui ont, pour

ce motif, donné le nom de *pompe monoclapet*. L'appareil est construit et exposé par MM. Prudon et Dubost, constructeurs à Paris. La figure 200 en représente les dispositions. La manivelle *A*, animée d'un mouvement de rotation rapide, actionne le piston *B*, lequel est mince, creux et muni d'un large clapet.

Dans son parcours vers le haut, le piston imprime à toute la colonne un mouvement, qui se continue quand le piston redescend. Les expériences qui ont été faites sur cet appareil ont montré que le rendement, dans des conditions convenables, peut être fort satisfaisant. Ainsi, pour une hauteur d'élévation de 31 mètres, à des vitesses d'environ 300 révolutions par minute, le rendement mécanique a atteint le chiffre élevé de 92 p. 100.

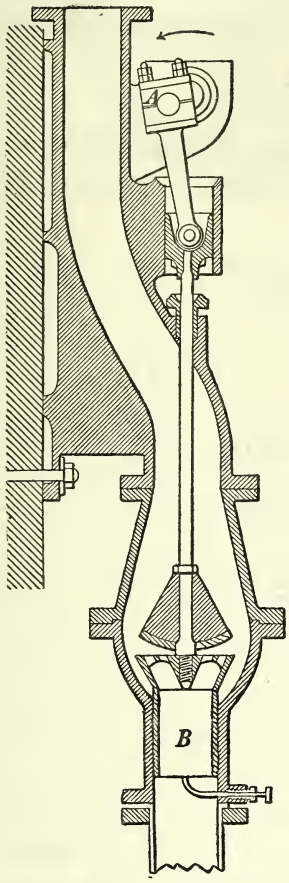


Fig. 200.
Pompe Henry et Du Marais.

Toutes les pompes que nous avons étudiées jusqu'ici comportent, comme organe essentiel, un piston de forme ronde circulant dans un cylindre, et animé d'un mouvement rectiligne alternatif. Ce mouvement est obtenu, le plus souvent, à l'aide d'une transmission par bielle et tige. De grands efforts ont été faits pour arriver à supprimer cette transmission. Parmi les nombreux inventeurs qui ont cherché la solution de ce problème, la plupart n'ont eu en vue que la simplification de l'appareil; d'autres, mieux avisés, se préoccupent davantage de réduire le poids et l'encombrement, ce qui peut être fort utile dans certaines applications.

De ces tentatives sont sorties en nombre considérable des dispositions plus ou moins réussies, plus ou moins ingénieuses. Il en est bien peu qui aient répondu aux espérances de leurs auteurs et qui se soient répandues dans la pratique. Les expositions précédentes étaient encombrées de pompes bizarres, pompes oscillantes, rotatives, etc. A l'Exposition de 1878, au contraire, l'ardeur des recherches dans cette direction semble s'être singulièrement calmée. Ce résultat est dû, pour une bonne part sans doute, aux mécomptes éprouvés de tous côtés. Mais il paraît juste de l'attribuer aussi à la diffusion des connaissances mécaniques et à une plus exacte appréciation des qualités à exiger d'une bonne pompe. En somme, en matière de pompes, aussi bien du reste qu'en matière de machines à vapeur, on en revient d'une façon presque unanime au piston et au cylindre. Ces organes semblent jusqu'ici les mieux appropriés aux conditions imposées : simplicité, étanchéité, solidité, économie, etc.

Les avantages qu'on a poursuivis en cherchant d'autres dispositions, sont, le plus souvent, compensés et au delà par des inconvénients fort graves. Parmi ces derniers,

il convient de mentionner, en toute première ligne, la difficulté de tenir le joint entre les parties fixes et mobiles.

Quoi qu'il en soit, par habitude ou pour satisfaire aux goûts variés de la clientèle, beaucoup de fabricants de pompes construisent encore de ces appareils, dans lesquels le piston ordinaire est remplacé par quelque autre organe remplissant les mêmes fonctions. Ces pompes sont d'ailleurs toujours de petit modèle, car, pour les grandes machines élévatoires, il n'est plus question de ces dispositifs variés. Voici quelques exemples choisis de manière à préciser l'état actuel des choses.

La pompe à piston oscillant, construite par MM. Souzay frères, d'Autun (Saône-et-Loire), est représentée fig. 201. Le diaphragme *AB*, actionné par l'axe carré *C* et le

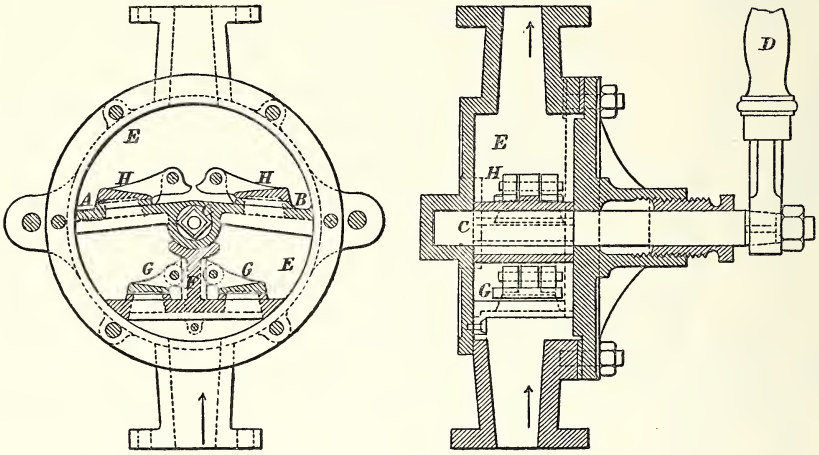


Fig. 201. — Pompe Souzay.

levier à main *D*, prend un mouvement d'oscillation. Il fait joint, le long de son pourtour, sur la paroi intérieure du corps cylindrique *EE*, et sur le bord de la cloison radiale *F*. Les soupapes d'aspiration sont en *G*, *G*, celles de refoulement en *H*, *H*. Le fonctionnement se comprend à première vue. L'appareil est simple, peu volumineux, facile à démonter et à visiter. On peut lui reprocher, comme à tous les appareils analogues, une étanchéité douteuse, obtenue seulement par un ajustage précis, et qui ne saurait se maintenir longtemps.

Voici (fig. 202) une pompe exposée par MM. W. F. B. Douglas, de Middletown, Conn. (États-Unis). Ces trois palettes *A*, *B*, *C* sont entraînées dans le mouvement de rotation continu du disque *DD*, monté sur l'axe *E*. Ces palettes peuvent en outre glisser dans leur propre plan, et leur mouvement radial est déterminé par les tetons *a*, *b*, *c*, qui s'engagent dans la rainure *FFF*, pratiquée dans les fonds du corps de pompe. Pour éviter que les différences de pression ne puissent gêner le mouvement radial, on a fait

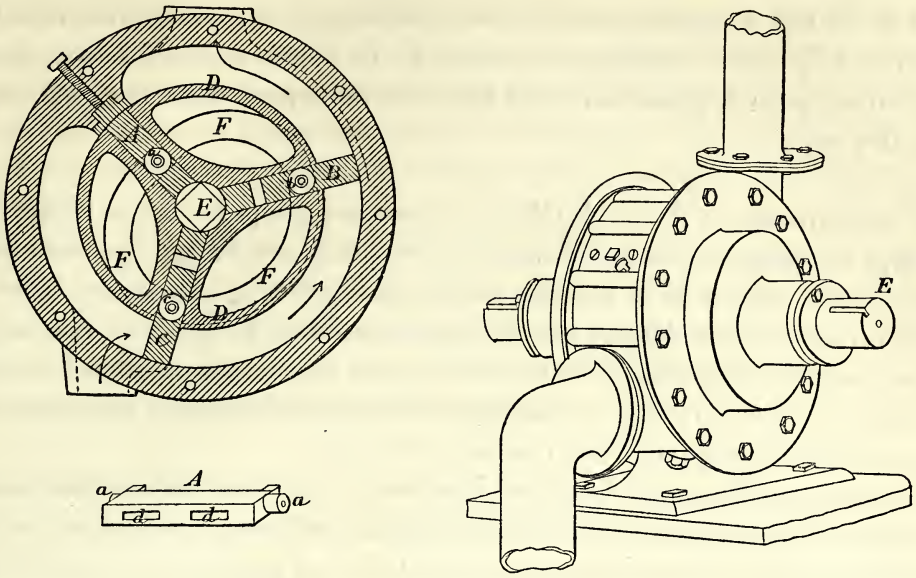


Fig. 202. — Pompe rotative de Douglas.

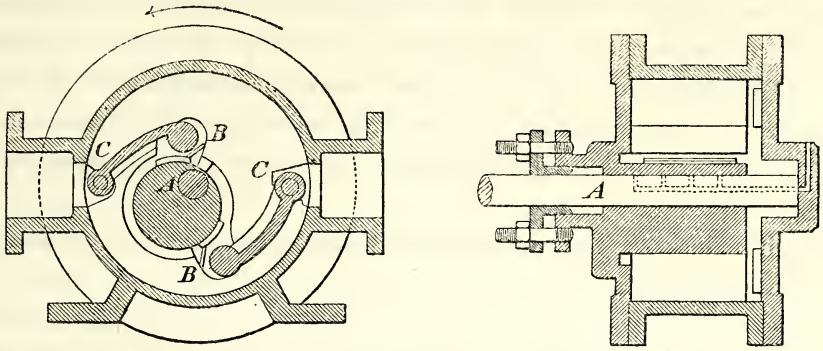


Fig. 203. — Pompe rotative de Skinner.

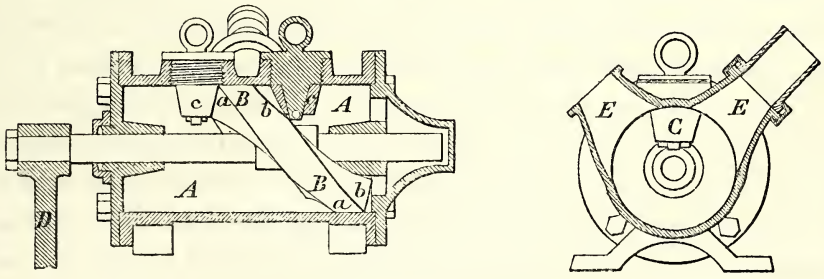


Fig. 204. — Pompe Montrichard.

communiquer le front et l'arrière de chaque palette par des canaux *d d* percés à travers le corps de la palette.

La pompe rotative (fig. 203) patentée par Skinner et Cie, et exposée par le Patent Pump and Blower Syndicate, de Londres, se rapporte au système à un axe excentré.

IMPRIMERIE NATIONALE.

L'axe de rotation *A* entraîne dans son mouvement deux patins *B*, *B*, qui servent d'articulation à l'une des extrémités des palettes *B*, *C*. L'autre extrémité *C* de celles-ci, munie d'une pièce de glissement, vient faire joint sur la paroi du tambour qui sert de corps de pompe.

M. de Montrichard, à Montmédy (Meuse), expose une pompe fort originale (fig. 204). Le corps de pompe *AA* est un cylindre. La jante du piston *BB* est également cylindrique; mais, au lieu de se terminer par des plans normaux à l'axe, ce cylindre est limité par des surfaces obliques *aa*, *bb*, fermées en forme de circuit. Si l'on imagine que ces surfaces soient guidées de manière à passer toujours par un point fixe, et que l'on imprime à l'axe du piston un mouvement de rotation continu, ce mouvement sera nécessairement accompagné d'une translation alternative.

Ce guidage est obtenu par deux galets coniques *cc*, montés sur des axes fixés au corps de pompe, et qui s'appuient sur les faces du piston, taillées en conséquence. Le mouvement de rotation est donné par une manivelle *D*, qui participe à la translation du piston.

Ce mouvement complexe a pour effet d'augmenter et de diminuer alternativement les capacités comprises entre les fonds du corps de pompe et les faces du piston. Les conduites d'aspiration et de refoulement aboutissent à deux lumières *E*, *E*, percées sur la paroi du corps de pompe. Ces lumières sont, en temps utile, fermées ou découvertes par la jante du piston, qui fonctionne à la façon d'un obturateur desmodromique.

Il est inutile d'insister; la conception est curieuse et originale, et, à ce titre, elle méritait d'être mentionnée.

Les pompes dites *à chapelet* sont fort répandues dans les exploitations horticoles et agricoles, pour les élévations d'eau en petites quantités et à hauteur modérée. Ces appareils dérivent des norias, qui sont usitées depuis l'antiquité et dont on trouve encore de nombreuses applications dans les pays d'Orient. La noria, comme on sait, est une chaîne sans fin, qui repose dans le haut sur la jante d'une poulie, et dont l'anse inférieure plonge dans l'eau à élever; une série de godets sont fixés à cette chaîne. Lorsque l'on fait tourner la poulie, la chaîne est entraînée avec elle; les godets se remplissent au fur et à mesure qu'ils s'immergent dans le bief inférieur; ils s'élèvent pleins avec le brin montant et, dans le haut, se déversent dans une coulotte. Ces godets, toujours en mouvement, laissent perdre beaucoup d'eau, de sorte que le rendement est assez médiocre. Mais l'appareil est extrêmement simple et rustique; il peut être construit et réparé par le premier ouvrier venu, ce qui le rend précieux dans bien des circonstances.

La pompe à chapelet est une machine plus perfectionnée : un tuyau vertical, plongeant par le bas dans la nappe à aspirer, est parcouru par le brin ascendant d'une

chaîne sans fin. Sur cette chaîne sont fixés, de distance en distance, des diaphragmes formant piston dans le tuyau. L'eau ainsi élevée se dégorge par le haut. Comme il y a toujours plusieurs diaphragmes circulant les uns au-dessus des autres dans la colonne verticale, l'étanchéité est facilement obtenue. Le rendement est fort satisfaisant, pour peu que la construction soit soignée, et, comme rusticité, l'appareil ne le cède en rien aux norias.

Pour les besoins ordinaires d'une petite ferme ou d'un jardin maraîcher, une pompe à chapelet actionnée par un simple manège donne, dans bien des cas, la solution la plus économique et la plus satisfaisante du problème de l'élévation des eaux.

Un grand nombre de maisons se livrent à la construction de ces modestes machines, qui rendent de si grands services dans les campagnes.

Nous arrivons à l'étude de machines élévatoires, qui, depuis quelques années, ont pris dans l'industrie une importance de premier ordre : il s'agit des pompes dites *centrifuges*.

La plupart des pompes que nous avons étudiées jusqu'ici peuvent être considérées commes des appareils statiques. Le liquide n'y prend que des vitesses assez faibles, et les pressions qu'il exerce se répartissent à peu près comme s'il était immobile, de sorte que les phénomènes résultent du poids et non de la masse. Les effets de l'inertie sont considérés comme nuisibles et atténués autant que possible.

Dans les pompes centrifuges, c'est au contraire l'inertie qui est le facteur principal. C'est en imprimant au liquide une vitesse suffisamment grande qu'on l'oblige à s'élever contre la pression de l'eau qui remplit la colonne ascensionnelle. La machine se compose en général d'une roue à ailettes, animée d'un mouvement de rotation rapide, qu'elle communique à l'eau dont elle est remplie. La force centrifuge qui en résulte a pour effet de produire une dépression vers le milieu et une tension sur le pourtour de la roue. L'eau, appelée par le vide à travers la conduite d'aspiration, qui aboutit au centre de la roue, se précipite dans les ailettes, qui la saisissent, la projettent avec force dans une caisse qui enveloppe la circonférence et l'obligent à remonter dans la colonne de refoulement.

L'origine des pompes centrifuges n'est pas bien ancienne. A l'Exposition universelle de 1855, l'on vit fonctionner, pour la première fois, croyons-nous, un appareil de démonstration, établi d'après les principes qui viennent d'être rappelés, et constitué par un tube de verre au bas duquel tournait une petite turbine mue à la main. Cette idée parut audacieuse et fut reçue avec froideur. Ce n'est pas que l'on pût mettre en doute la possibilité d'élever un liquide à l'aide de la force centrifuge; mais on était habitué aux allures lentes, et les grandes vitesses semblaient inséparables d'un mauvais rendement.

Les premières applications pratiques de la pompe centrifuge sont attribuées à l'ingénieur Appold; et, suivant les prévisions d'alors, les résultats laissaient fort à désirer

comme utilisation de la puissance mécanique. L'idée fut reprise, étudiée, développée avec persévérance, en Angleterre, par la maison Gwynne, et en France, par la maison Neut et Dumont. Une longue pratique a fini par révéler à ces ingénieurs habiles les défectuosités des types primitifs et leur fournir les moyens d'y remédier. Aujourd'hui les pompes centrifuges, bien construites et employées dans des conditions convenables, atteignent des rendements comparables à ceux que donnent les bonnes pompes à piston.

Elles présentent sur ces pompes quelques avantages qui, dans certains cas, deviennent décisifs. En premier lieu, le liquide débouche, à la fois, par tout le pourtour de la turbine et avec une grande vitesse, ce qui assure un débit considérable sous un faible encombrement. L'appareil est léger; il reçoit directement son mouvement d'une poulie, sans autre transmission mécanique qu'une courroie. Il ne comporte aucun organe délicat, tel que clapets, soupapes, garnitures, etc. Le liquide ne rencontre sur son trajet aucun orifice étroit, aucun organe frottant.

La pompe est donc capable d'élever des eaux sales, chargées de vase, de sable, et même de petit gravier.

Cette dernière propriété la rend précieuse, en particulier, pour les épuisements que nécessitent les fondations hydrauliques, et c'est dans ces sortes de travaux que la pompe centrifuge a reçu ses premières applications un peu importantes; puis elle s'est développée, répandue, et nous aurons tout à l'heure à étudier quelques installations où ce genre de machines atteint des proportions imposantes.

En France, la maison la plus importante pour la fabrication des pompes centrifuges, celle qui a apporté les plus utiles perfectionnements à ces appareils et contribué à en répandre l'usage est la maison Neut et Dumont, aujourd'hui L. Dumont, de Paris. La figure 205 représente une pompe Dumont.

La turbine *AA* comporte des ailettes courbes, comprises entre deux flasques *B*, *B*, formant un ajutage, qui est plus étroit vers le pourtour et s'élargit vers le centre, de manière à compenser les différences de diamètre et à éviter les changements brusques de vitesse. Cette turbine est raccordée, par trois bras *a*, *a*, *a*, à un moyeu *C*, venu de fonte avec elle, et monté sur l'arbre tournant *DD*. L'eau est amenée par la conduite d'aspiration *EE* jusque vers le moyeu, et les raccordements sont dessinés de manière à ménager les changements progressifs de direction des filets liquides. Afin d'éviter la poussée latérale qui résulterait d'un défaut de symétrie, on a donné deux ouïes à la turbine, et bifurqué en conséquence la conduite d'aspiration. L'eau qui s'échappe du pourtour de la turbine est recueillie par un collecteur circulaire *FF*, dans lequel vient aboutir la conduite ascensionnelle *G*.

Le collecteur et les deux branches de la conduite forment une coquille, laquelle, pour faciliter le montage et la visite, est en deux pièces, assemblées par un joint plan, normal à l'axe. Chaque demi-coquille porte un coussinet *bb*; l'une est en outre munie d'un presse-étoupe *c*, que l'arbre tournant traverse, pour aboutir à la poulie récep-

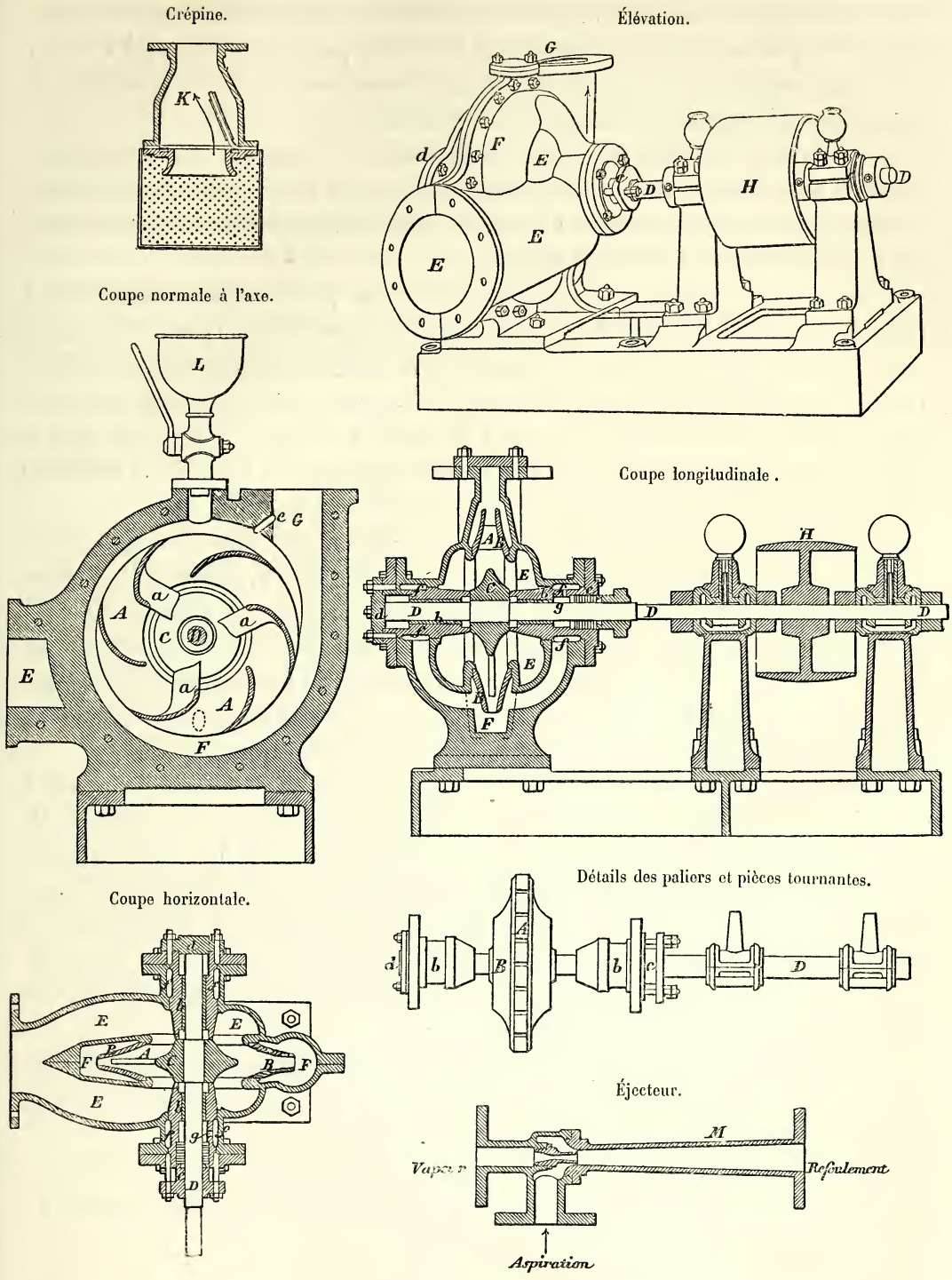


Fig. 205. — Pompe centrifuge Dumont.

trice *H*. L'autre bout de l'arbre se termine dans une capacité close par un bouchon boulonné *d*.

La souche *E* de la conduite d'aspiration s'assemble à bride avec des tuyaux en tôle galvanisée ou en caoutchouc, terminés dans le puisard par un clapet de pied *K*, muni d'une large crépine. Ce clapet sert, comme on le verra, pour amorcer l'appareil et en empêcher le désamorçage; le battant est en caoutchouc.

La conduite de refoulement, dont la souche est en *G*, commence par un tuyau en forme de tronc de cône allongé. Cette disposition permet de regagner progressivement le diamètre plus large du corps de conduite, et de transformer en pression la vitesse que possède l'eau à sa sortie de la turbine.

Pour amorcer la pompe on la remplit d'eau, ainsi que la conduite d'aspiration, à l'aide de l'entonnoir à robinet *L*. Le clapet de pied soutient l'eau que l'on verse pendant cette opération. L'air contenu dans la pompe et la conduite s'échappe par le petit canal *e*. Une fois l'appareil rempli, il suffit de donner le mouvement avec une vitesse convenable pour obtenir un débit régulier. Lorsque l'on arrête la machine, le clapet de pied se ferme et tient l'appareil plein et prêt à se remettre en route. Ce n'est qu'à la suite d'un arrêt prolongé qu'il est nécessaire de recommencer l'amorçage.

La turbine tournant vite, il faut éviter l'échauffement des coussinets; c'est l'objet des petits canaux circulaires *f*, *f*, lesquels communiquent avec le refoulement et maintiennent une couche d'eau froide en contact avec le bronze. En outre, l'air tend à s'introduire par le presse-étoupe dans le centre de la turbine où règne une dépression. Cet air, en se cantonnant près de l'axe, troublerait le fonctionnement de l'appareil et amènerait le désamorcement. On empêche cet effet de se produire à l'aide des trous *g*, *g*, qui amènent l'eau de refoulement au contact de l'arbre.

Avec les grosses pompes, l'amorçage est assez long, si l'on doit verser l'eau seau à seau pour remplir l'appareil. On fait souvent usage, pour cet objet, d'un éjecteur *M*, que l'on monte à la place de l'entonnoir *L*. La vapeur, prise à la chaudière et lancée dans l'éjecteur, entraîne l'air qui se trouve dans la pompe et produit le plein par aspiration. Il va de soi que, pour cet effet, il faut que la conduite de refoulement soit fermée par un clapet, ou bien que son extrémité soit immergée dans le bief supérieur. Cette dernière disposition est avantageuse, en ce qu'elle permet de n'élever l'eau que de la hauteur strictement indispensable.

Afin de donner une idée plus précise des proportions et du fonctionnement de cette remarquable machine, nous tirerons quelques chiffres des documents fournis par la maison Dumont, et nous les appliquerons à un exemple.

Supposons qu'il s'agisse d'élever par minute 4.5 mètres cubes d'eau à 6 mètres de hauteur, ce qui correspond à une puissance en eau montée de 6 chevaux-vapeur. La pompe à employer aurait les dimensions suivantes :

Diamètre de la turbine	450 millim.
Patin (y compris le double palier de la poulie)	1330 × 600
Hauteur du dessous du patin au sommet de la tubulure de refoulement	850
Nombre de tours par minute	620

La puissance à développer à la poulie de commande serait d'environ 10.5 chevaux.

Les pompes centrifuges sont spécialement appropriées aux cas où la hauteur d'élévation est modérée, et ne dépasse guère une huitaine de mètres. Pour les grandes hauteurs, le rendement diminue rapidement, et l'appareil refuse même le service. Cependant cette difficulté peut être tournée assez facilement : il suffit de conjuguer deux ou plusieurs pompes, de telle sorte que le refoulement de l'une se rende dans l'aspiration de la suivante. La théorie démontre, et l'expérience confirme, que l'on obtient ainsi de fort bons résultats. L'application de ce principe peut revêtir des formes très variées. En voici deux spécimens :

La figure 206 représente deux pompes étagées, chacune étant munie de sa poulie et actionnée par sa transmission spéciale.

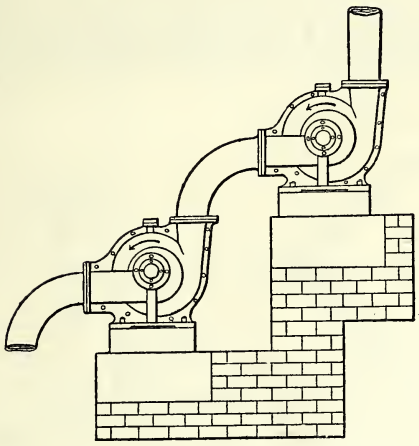


Fig. 206. — Pompes étagées.

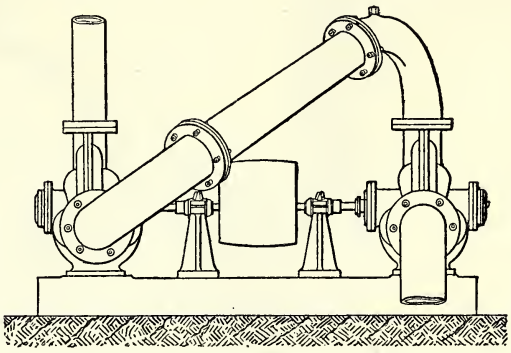


Fig. 207. — Pompes conjuguées.

Dans la figure 207, les deux pompes sont parallèles, côte à côte, assemblées sur un même patin en fonte qui les rend solidaires, et montées sur un même axe, actionné par une seule poulie réceptrice. Un tuyau contre-coudé réunit le refoulement de la pompe de droite à l'aspiration de la pompe de gauche.

Le montage des pompes centrifuges se fait de bien des manières. On les place ordinairement au-dessous, mais aussi quelquefois au-dessus du bief supérieur. Dans certaines installations, on a été conduit à les établir au-dessous du niveau du bief inférieur, ce qui évite toute difficulté pour l'amorçage. Le plus souvent la commande est faite par courroies. Pour les grands appareils, on préfère la commande par engrenages, ou même, dans le cas où la place fait défaut, la commande directe, l'axe de la pompe faisant suite à l'axe du moteur. On a ainsi des appareils fort ramassés, eu égard à leur puissance.

Les applications des pompes centrifuges sont aujourd'hui extrêmement nombreuses. On les emploie pour les épuisements, les distributions d'eau, l'alimentation des canaux, les irrigations, les desséchements, la submersion des vignes phylloxérées, l'épui-

sement des formes de radoub, chaque fois, en un mot, qu'on a à élever beaucoup d'eau à une hauteur qui n'est pas trop grande.

Nous donnons (fig. 207 et 208), à titre d'exemple, un croquis de la belle et grande usine, construite par M. Dumont, pour l'épuisement des immenses waeteringues qui bordent le littoral de la mer du Nord entre Dunkerque et Furnes, et s'étendent sur les territoires de la France et de la Belgique.

Les waeteringues sont, comme on sait, des plaines basses, dont l'altitude est inférieure à celle des hautes mers, et qui ne peuvent être asséchées et maintenues à sec qu'à l'aide d'énormes travaux d'endiguement, de canalisation et d'épuisement.

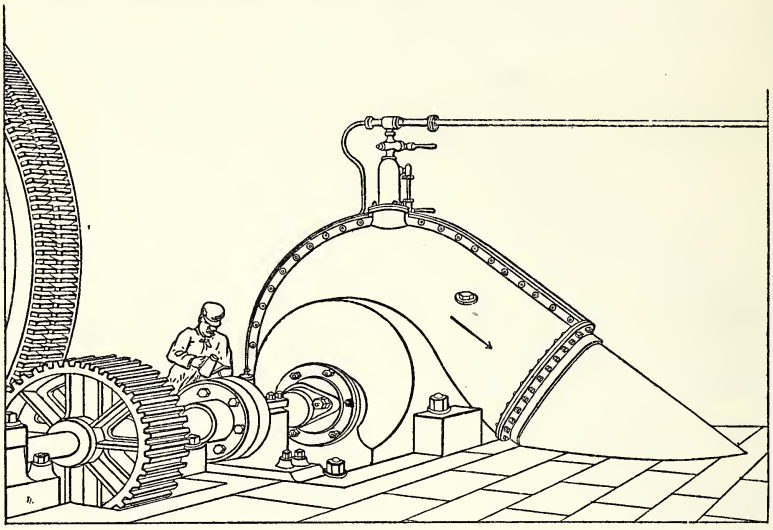


Fig. 207. — Pompe de waeteringues de Steendaam. — Vue perspective.

Au cas particulier, le périmètre à assécher présente une superficie de 15,370 hectares. Le volume d'eau à débiter a été évalué à 4 mètres cubes par seconde (350,000 mètres cubes par vingt-quatre heures). La hauteur d'élévation varie de 0 à 2 m. 50; elle est, en moyenne, d'environ 1 mètre. L'usine se compose de deux machines à vapeur conjuguées sur un arbre commun; le volant denté actionne, par un pignon, deux pompes centrifuges Dumont montées sur un même arbre. Les machines ont 1 m. 20 de course, 720 millimètres de diamètre de piston; elles font trente-huit tours en allure normale, et développent 107 chevaux chacune, à la pression de 4 kilogr. 25 aux chaudières et à l'admission très faible de 1/20. Elles ont été construites par MM. Le Gavrian et fils, de Lille. Elles sont alimentées par trois chaudières, dont une de réserve. Ces chaudières sont du type ordinaire à bouilleurs; chacune d'elles présente une surface de chauffe de 80 mètres carrés.

Les pompes sont disposées sur le parcours d'une conduite ascensionnelle formant siphon. Cette disposition a pour effet de réduire l'élévation de l'eau au minimum résultant des circonstances journalières. Elle présente, en outre, l'avantage de placer tout

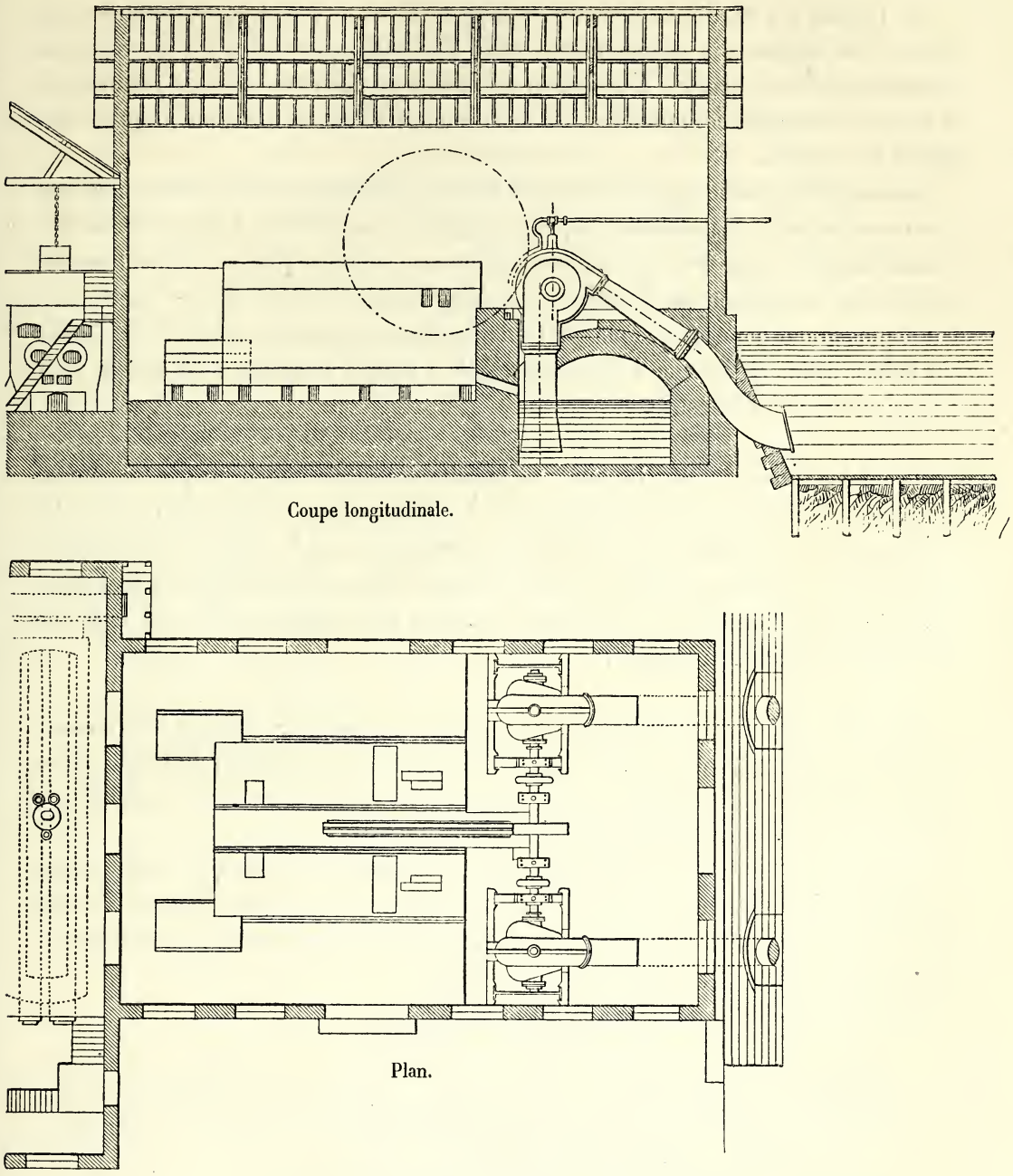


Fig. 208. — Usine des waeteringues de Steendaam.

l'appareil au-dessus du niveau des eaux, ce qui permet de le vider complètement pendant les gelées. L'amorçage se fait par un éjecteur branché au sommet du corps de pompe. Lors de l'arrêt des pompes, pour éviter le siphonnement en sens inverse, il suffit de laisser rentrer l'air, en ouvrant le robinet de l'éjecteur. La même manœuvre permet de vider l'appareil.

La turbine a 1 m. 80 de diamètre, et fait, à l'allure normale, 90 révolutions par minute; sa largeur à la circonférence est de 350 millimètres; il n'y a ni crépine ni clapet de pied. La tubulure d'aspiration a 1 mètre de diamètre, celle de refoulement 0 m. 80. A partir de ces tubulures, les deux conduites vont en s'évasant jusqu'au diamètre de 1 m. 20.

Ces machines fonctionnent souvent nuit et jour sans interruption, pendant plusieurs semaines; depuis leur installation en 1879, elles n'ont donné lieu à aucun mécompte; l'asséchement régulier des waeteringues peut être considéré comme absolument assuré. La dépense du charbon est d'environ 200 kilogrammes à l'heure. Cette construction fait le plus grand honneur à la maison Dumont, dont la réputation est d'ailleurs établie sur la base solide et légitime des services qu'elle a rendus et qu'elle rend chaque jour à l'agriculture et à l'industrie.

A côté des Dumont et des Gwynne, et à la suite des succès remportés par les pompes centrifuges, d'autres maisons se sont livrées à la fabrication de ces machines, en les modifiant plus ou moins, sans s'écarter des dispositions que l'expérience avait consacrées. Nous ne croyons pas utile d'en faire la nomenclature. Nous étudierons seulement quelques installations qui se distinguent, soit par leur puissance, soit par la bonne entente des conditions à remplir.

Nous avons déjà mentionné la superbe machine élévatoire exposée par la Compagnie de Fives-Lille (Nord), et destinée à l'épuisement des formes de radoub du port de Dunkerque. L'installation complète doit se composer de quatre appareils, semblables à celui qui est exposé, et de diverses machines accessoires.

L'appareil exposé se compose d'une machine verticale compound et d'une pompe centrifuge de grandes dimensions, montée sur l'arbre de la machine. L'ensemble doit être établi sur un solide diaphragme en fonte, placé en contre-bas des hautes mers et soigneusement étanché contre les maçonneries.

Voici les principales données relatives à la pompe :

Hauteur d'élévation de l'eau		de 0 à 7 mètres.
Nombre de tours par minute		de 100 à 120 tours.
Débit d'une pompe par seconde	au commencement de l'opération	1,500 litres.
	à la fin de l'opération	660
Diamètre de la turbine		2m 400
Largeur des aubes au pourtour		0 100
Diamètre des ouïes		1 200

L'amorçage se fait par un éjecteur.

M. Decoeur a cherché à améliorer le rendement et à simplifier la construction de la pompe centrifuge. L'appareil qu'il a étudié, et qui est construit et exposé par la

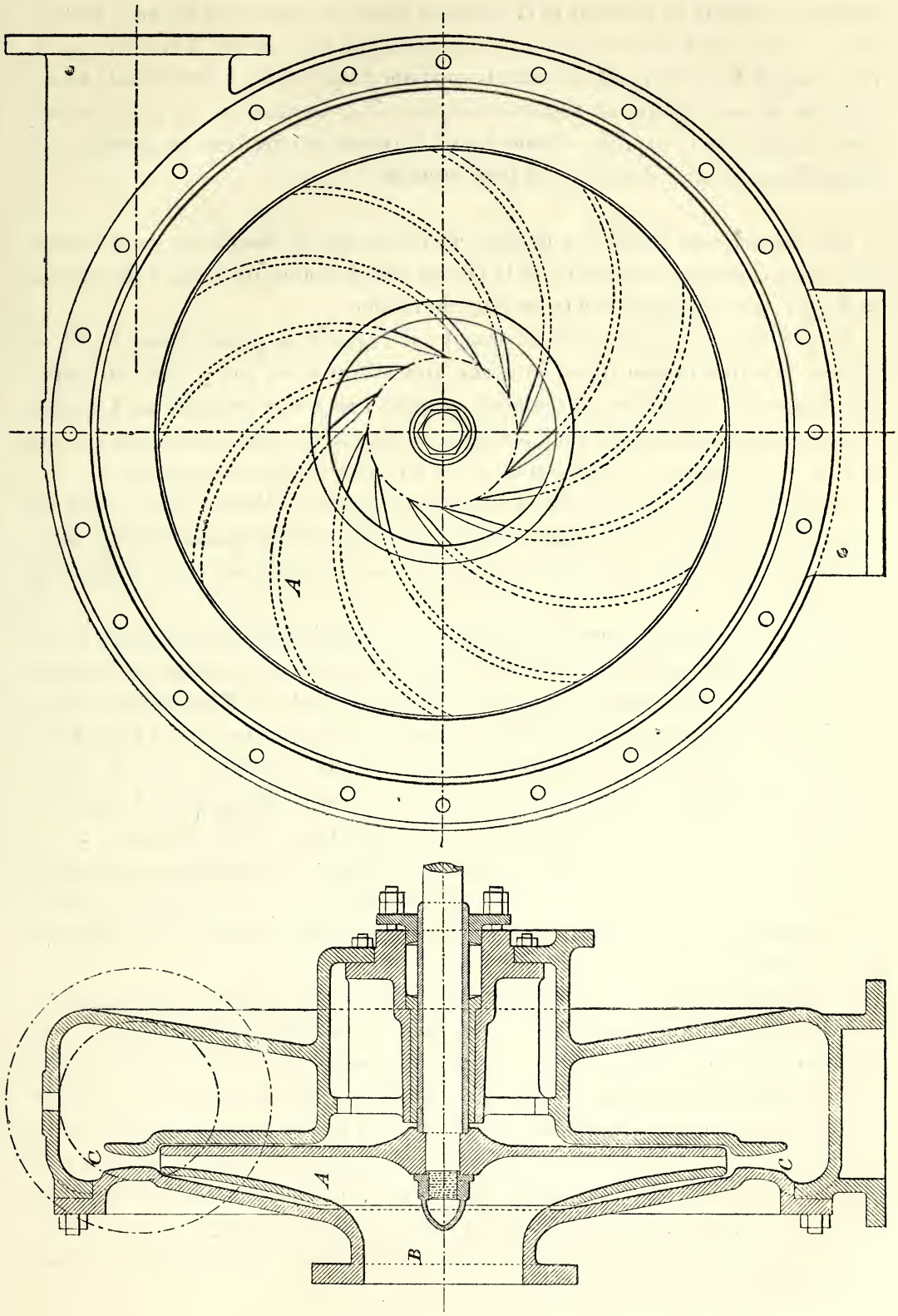


Fig. 209. — Pompe Decœur.

Société des ateliers et chantiers de la Loire, de Paris, est représenté fig. 209. La turbine *A*, composée d'ailettes courbes, se raccorde, par des surfaces à grand rayon, à l'ouïe unique *B*, sur laquelle se monte la conduite d'aspiration. La particularité caractéristique de cette pompe est l'éjecteur circulaire *CC*, constitué par un prolongement évasé des joues de la coquille, et dans lequel la vitesse se transforme en pression. Ce dispositif semble avoir donné de fort bons résultats.

Nous terminerons l'étude des pompes centrifuges par la description de la magnifique usine élévatoire, construite par la maison Joseph Farcot, de Paris, à Khatatbeh, en Égypte, pour l'irrigation de la province du Béhéra.

Le problème à résoudre était le suivant : il s'agissait de prendre dans le Nil et d'élever l'énorme volume d'eau de 2,500,000 mètres cubes par journée de vingt-trois heures (30,000 litres par seconde), pendant 120 à 130 jours par an. Les cotes des plans d'eau des deux biefs étant variables, la hauteur d'élévation varie entre 0 m. 50 et 3 m. 50; la dépense de combustible devait être aussi réduite que possible.

Ce qui caractérise les conditions d'un pareil programme, c'est cet énorme débit de 30 mètres cubes par seconde, comparable à celui d'une de nos grandes rivières. Sous une hauteur de 3 mètres, ce chiffre correspond à une puissance de 1,200 chevaux en eau montée.

Ce qui compliquait également la question, c'est la difficulté des fondations : le sol est vaseux et compressible. De plus, sur l'emplacement même à occuper se trouvait une ancienne usine élévatoire. Cette usine se composait de dix vis d'Archimède en tôle, de 3 m. 69 de diamètre et 11 m. 23 de longueur, mises en mouvement, à l'aide d'engrenages, par trois puissantes machines compound. Cette installation, faite en 1882, n'avait pu fonctionner et devait être remplacée par le nouvel établissement à installer; les fondations de l'ancienne usine devaient être, autant que possible, utilisées.

A la suite d'un concours, la maison Farcot fut chargée de l'installation, par contrat du 2 juin 1883. L'usine devait être prête à fonctionner pour la campagne de 1885. La consommation par cheval-heure en eau montée ne devait pas dépasser 1 kilogr. 75 de bon charbon anglais.

La disposition adoptée par M. Farcot est à la fois originale et hardie (fig. 210), mais elle répond d'une façon remarquable aux données du problème. L'usine comporte cinq machines élévatoires, chacune d'une puissance de 6 mètres cubes par seconde, alimentées par huit chaudières tubulaires, ayant chacune une surface de chauffe de 175 mètres carrés. Chaque appareil se compose d'une machine à vapeur horizontale, dont l'arbre est vertical, et d'une pompe centrifuge dont l'axe, également vertical, se confond avec celui du moteur. Il fallait une bien grande confiance, pour adapter des combinaisons aussi neuves à des appareils devant développer jusqu'à 300 chevaux en eau montée, soit près de 500 chevaux sur les pistons. Le succès final est venu démontrer la justesse des prévisions.

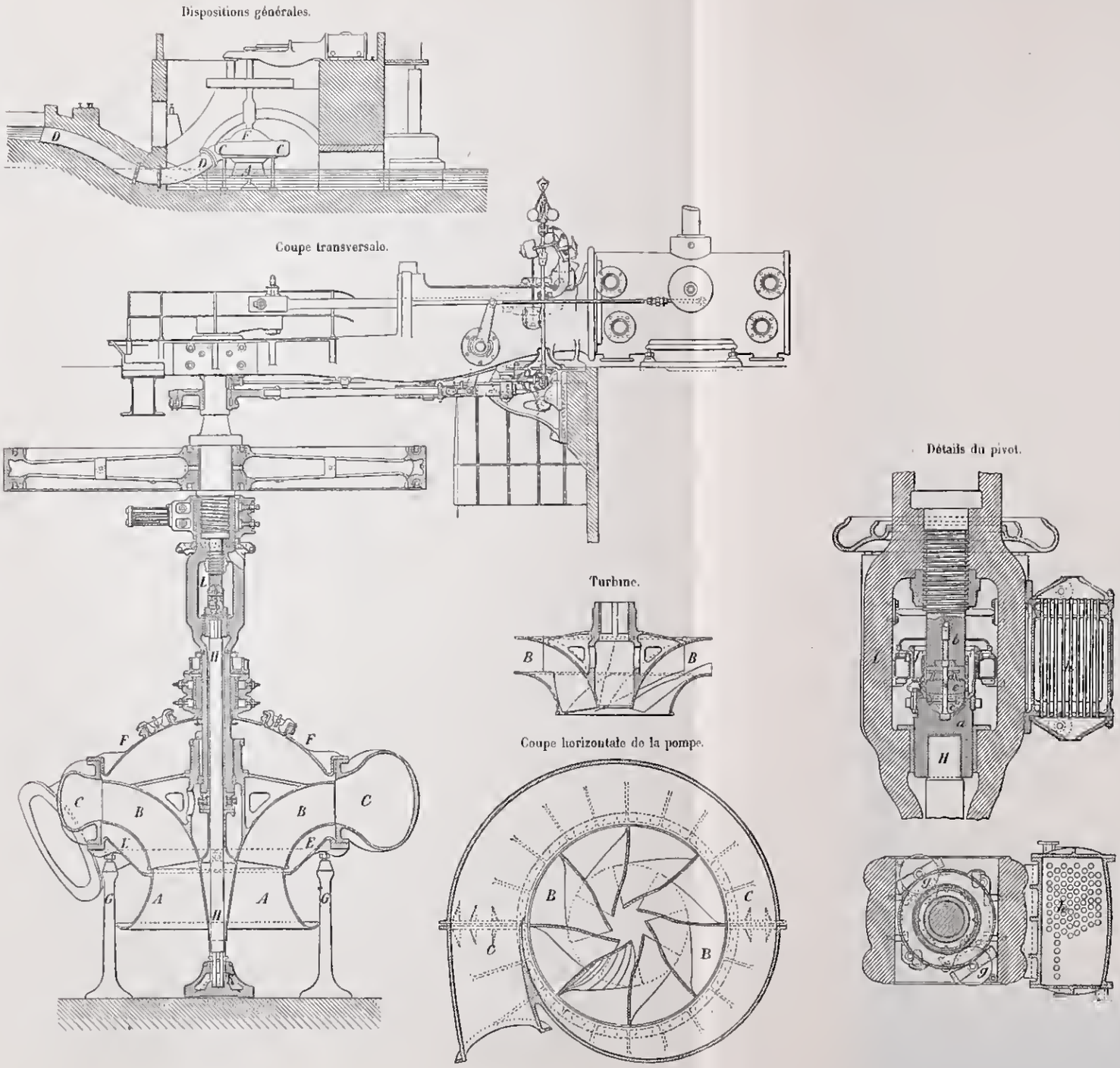


Fig. 210. — Usine de Khatatbeh, par Farcot.

La machine est à quatre distributeurs, du genre Corliss-Farcot, avec cylindre de 1 mètre de diamètre sur 1 m. 80 de course. L'axe de la machine étant vertical, le mécanisme tout entier, bâti, guides, glissières, paliers, a été orienté parallèlement au plan médian de la machine, qui est horizontal; un dispositif spécial soulage la manivelle du poids de la bielle. Mentionnons également les dispositions ingénieuses du régulateur. Comme la hauteur d'élévation est fort variable (de 0 m. 50 à 3 m. 50) la vitesse de rotation doit également varier dans des limites étendues, de 16 à 42 tours.

La commande de l'axe du régulateur est faite par deux trains d'engrenage, embrayables successivement : l'un, à grand rapport, est employé pour les petites vitesses; l'autre, à faible rapport, sert pour les allures vives. De plus, le régime peut être modifié progressivement par un contrepoids mobile sur un bras horizontal.

La pompe proprement dite mérite une attention particulière, non seulement par ses dimensions exceptionnelles, mais encore par ses formes originales et par les soins attentifs avec lesquels elle a été dessinée. Ce n'est qu'à la suite d'études approfondies que MM. Farcot ont arrêté les dispositions de cette pompe, études d'un caractère essentiellement expérimental, car le calcul théorique a peu de prise sur les phénomènes compliqués qui se passent dans une machine de cette nature.

Le liquide, qui est à peu près immobile dans le bief inférieur aussi bien que dans le bief supérieur, doit nécessairement prendre des vitesses assez grandes dans son parcours à travers la pompe. Eu égard à la faible hauteur d'élévation et à l'économie de travail imposée par le programme, il est indispensable que ces variations dans les mouvements des filets liquides soient progressives, aussi bien comme direction que comme vitesse. Tel est le principe, tout à fait rationnel, qui a servi de guide dans le tracé de cette pompe. Les figures ci-jointes montrent comment il a été appliqué.

Les eaux sont prises dans le bief inférieur par un ajutage *AA*, parfaitement évasé, dont le diamètre passe progressivement de 3 mètres dans le bas à 2 m. 10 à la gorge. En même temps, un cône renversé, qui se dresse au centre, contribue à diminuer la section à l'entrée de la turbine. Celle-ci *BB* est comprise entre deux méridiens de forme parabolique, à tangente presque verticale dans le bas, et horizontale dans le haut; elle comporte huit ailettes hélicoïdales.

La turbine dégorge ses eaux dans un canal *CC*, en forme de colimaçon, qui l'entoure de toute part et dont la section augmente progressivement. Celui-ci se termine par un gros ajutage tangentiel, sur lequel vient s'assembler un tuyau *DD* de section lentement croissante, qui débouche dans le bief supérieur, par un clapet de retenue en bois. La forme en siphon donnée à cette conduite ascensionnelle a pour effet d'éviter les rentrées d'air et par suite le désamorcement, même après plusieurs heures d'arrêt. L'amorçage se fait à l'aide d'éjecteurs.

Le corps de pompe est constitué par deux cloches, l'une inférieure *EE*, l'autre supérieure *FF*, qui, boulonnées sur les brides venues avec le conduit en colimaçon *CC*, forment avec lui un tout indéformable.

Des précautions spéciales ont été prises en vue de parer aux tassements à prévoir dans un sol vaseux. Le corps de pompe repose sur six colonnes en fonte *GG*, à l'aide de vérins à vis permettant de rattraper les tassements. Le système tournant, constitué par la turbine, son arbre, le lourd volant de la machine, la manivelle et les accessoires, porte, à l'aide d'un pivot à rappel *L*, sur une colonne en fer *HH*, assemblée dans un fort patin *K* scellé dans la maçonnerie du radier.

Le pivot *L*, placé au-dessus du niveau des eaux, a été une des parties difficiles de la construction; on n'est arrivé qu'après diverses retouches à le faire fonctionner convenablement. La masse tournante qui le charge pèse en effet près de 50 tonnes, et fait jusqu'à 42 tours par minute, et l'on avait à redouter l'échauffement et le grippement. Voici les dispositions qui ont permis de surmonter ces difficultés.

Le sommet de la colonne *H* est coiffé d'une tête en fonte *a*, sur laquelle repose le pivot *b* par l'intermédiaire des pièces ci-après : deux grains en bronze phosphoreux *c*, *d*, fixés l'un sur la tête *a*, l'autre sous le pivot *b*, et une lentille en acier trempé *e*; le tout est maintenu et centré par une enveloppe en bronze *ff*. Un canal intérieur reçoit l'huile sous pression et la distribue entre de nombreuses pattes d'oie. Cette huile est en circulation permanente, sous l'action des deux pompes rotatives *g*, *g*, mises en mouvement par un petit engrenage. Au sortir du pivot, elle se rend dans l'appareil tubulaire *h*, où elle se refroidit et se décante, pour être reprise par les pompes *g*, *g* et renvoyée sous le pivot.

L'arbre de la turbine est creux, pour recevoir la colonne *HH*, et pénètre dans le corps de pompe par un presse-étoupe. Cet arbre est en outre guidé en divers points de sa hauteur, comme l'indiquent les dessins.

Les dimensions principales de ce remarquable mécanisme sont résumées dans le tableau ci-après :

Machine à vapeur.

Diamètre du piston	1m,000
Course	1 800
Diamètre du volant	6 800
Poids du volant	22,000 kilogr.

Turbine.

Diamètre extérieur		3m,800
Hauteur		1 425
Largeur des orifices	à l'entrée	0 760
	à la sortie	0 630
Diamètre de l'œillard		2 145

Ajutage d'entrée.

Diamètre extérieur	3m,250
Diamètre inférieur	3 000
Diamètre supérieur	2 100
Hauteur	0 900

Récepteur en colimaçon.

Hauteur à l'entrée	$0^m,680$
Profondeur et largeur	variables.
Diamètre à la sortie	$1^m,600$

Conduite ascensionnelle.

Longueur totale	17^m800
Orifice de décharge (rectangulaire)	$2,500 \times 4,000$

En juin 1886, ces machines, alors en plein fonctionnement, ont été soumises par M. Brühl à des expériences précises. Sous une dénivellation de 3 m. 13, le rendement, rapport du travail en eau montée au travail indiqué sur les pistons, s'est élevé au chiffre de 0.651. Ce résultat remarquable et, on peut le dire, exceptionnel, est dû, sans nul doute, aux longues et coûteuses expériences qui ont précédé la construction de cette belle usine, et à l'entente parfaite et minutieuse qui a présidé tant au dessin qu'à l'exécution. Il fait le plus grand honneur à M. Paul Farcot, qui a dirigé les études et la construction, et à la maison Farcot dont il confirme et rehausse la vieille réputation.

A l'Exposition de 1889 on voyait figurer, outre les dessins de l'usine de Khatatbeh, le moule du canal en colimaçon, admirable pièce obtenue par des procédés ingénieux, spécialement inventés pour le moulage de cette pièce délicate et colossale.

Pour terminer l'étude des appareils élévatoires, nous examinerons quelques machines qui se distinguent entièrement des pompes ordinaires : les béliers hydrauliques et les pulsomètres.

Le bélier hydraulique, comme on sait, a été inventé en 1796 par Joseph Montgolfier; il apparut alors comme un véritable paradoxe mécanique, au même titre que, soixante ans plus tard, l'injecteur automoteur de Giffard. On voyait, sous l'action d'une faible chute, l'eau s'élever, bien au-dessus du bief supérieur, sans l'intermédiaire d'aucun piston ni d'aucun moteur mécanique; c'était un sujet de profond étonnement pour les mécaniciens.

Montgolfier s'était nettement rendu compte des effets que peut produire l'énergie accumulée dans un liquide qui s'écoule par un tuyau; et, dans un appareil aussi simple que complet, il utilisait directement cette énergie, pour l'élévation d'une partie du liquide. Le bélier travaille par pulsations. Pendant un certain intervalle, l'eau s'écoule librement; puis, lorsque l'eau contenue dans la conduite a acquis une vitesse suffisante, l'orifice d'écoulement est fermé brusquement par un clapet d'arrêt, et l'énergie contenue dans la masse d'eau en mouvement se transforme en pression, qui force une partie du liquide à s'élever, à travers une soupape, dans une conduite ascensionnelle.

L'appareil fonctionnait bien, mais il ne durait pas. Les chocs de l'eau et des soupapes ne tardaient pas à le mettre hors d'usage, malgré les réservoirs d'air dont Montgolfier

l'avait muni. Après d'assez nombreux mécomptes, le bélier finit par être à peu près abandonné.

En 1860, M. Ernest Bollée, fondeur, au Mans, reprit la question. Grâce à des perfectionnements bien entendus, il finit par rendre à cet ingénieux appareil les qualités pratiques qui lui faisaient défaut sous sa forme primitive.

En premier lieu, il s'attacha à atténuer la brutalité du choc qui se produit entre la soupape d'arrêt et son siège, au moment du coup de bélier. Ce résultat fut obtenu à l'aide d'une sorte de frein hydraulique, agissant sur le pourtour de la portée.

La soupape d'arrêt est équilibrée au moyen d'un contrepoids, ce qui lui permet de suivre docilement tous les mouvements du liquide qui la baigne, condition essentielle pour obtenir un bon rendement. Pour atténuer les effets de la masse mobile, la liaison entre le clapet et le levier d'équilibre est faite par un ressort flexible.

Dans le bélier de Montgolfier, le renouvellement de l'air dans les cloches se fait par l'aspiration à travers un petit trou percé sur le corps du bélier. Celui-ci doit donc être émergé, c'est-à-dire élevé au-dessus du niveau d'aval. M. Bollée plaça l'orifice d'aspiration au sommet d'une petite colonne, et dès lors il put immerger le corps du bélier, c'est-à-dire utiliser la totalité de la hauteur de chute.

Ces divers perfectionnements eurent pour résultat d'assurer au bélier hydraulique un rendement fort satisfaisant, d'en faire une machine plus durable et moins coûteuse d'entretien; aussi l'usage s'en est-il assez rapidement propagé. M. E. Bollée père et son fils, Ernest Bollée, qui lui succéda en 1880, ont fourni jusqu'à 600 béliers, de puissances et de dimensions diverses. M. Bollée fils a d'ailleurs continué la tradition de la maison, et apporté à la construction des béliers d'importants perfectionnements. Nous allons, entre beaucoup d'autres, en décrire un d'invention récente.

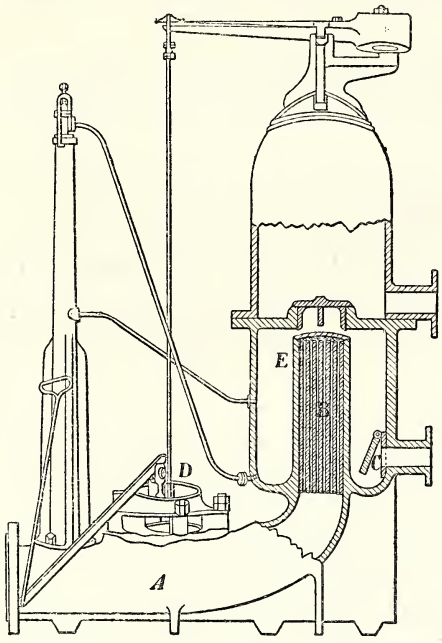


Fig. 211. — Bélier à deux eaux de Bollée.

En général, l'eau élevée par un bélier est prise dans le cours d'eau même dont la chute est utilisée. Mais, dans certains cas, il peut y avoir intérêt à se servir d'une chute pour élever une eau de provenance différente. L'eau motrice peut être bourbeuse, insalubre, alors qu'on a besoin d'élever, par exemple, l'eau d'une source pure. M. Bollée fils a imaginé, pour cet objet, un dispositif intéressant (voir fig. 211). Le coup de bélier donné par le corps *A* est transmis, à travers un faisceau de tubes *B*, à l'eau à refouler, qui arrive par le clapet *C*. Le mélange des deux eaux est

empêché par le faisceau de tubes. L'eau afflue en *C* avec une certaine prépondérance, de telle sorte qu'une partie s'échappe, à chaque pulsation, par la soupape d'arrêt *D*. Grâce à cet artifice, la cloche *E* et une partie du corps de bélier se maintiennent toujours pleins d'eau pure, et l'on n'a pas à craindre le refoulement de l'eau motrice dans la colonne ascensionnelle.

A la suite des travaux de M. Bollée père, auquel revient l'honneur d'avoir remis en faveur le bélier hydraulique, plusieurs maisons se sont livrées, non sans succès, à la construction de cette machine, l'ont étudiée à nouveau et en ont amélioré la construction. Citons, entre beaucoup d'autres, M. Durozoi et M. Decoeur, de Paris, et la grande maison W. F. B. Douglas, de Middletown, Conn. (États-Unis).

Le *pulsomètre,* imaginé par l'ingénieur américain Henry Hall, est une ingénieuse pompe à vapeur, qui figurait à un grand nombre d'exemplaires dans les galeries de l'Exposition de 1878, et avait éveillé la plus vive curiosité. Dans cette machine, la pression de la vapeur agit directement sur la surface de l'eau à élever, sans l'intermédiaire de pistons ni de tiges. De cette façon, les organes mobiles se réduisent à des clapets et à une petite soupape faisant office de distributeur. Le pulsomètre, dans son principe comme dans ses traits généraux, n'est autre chose que la reproduction de la plus ancienne de toutes les machines à vapeur qui ont rendu des services industriels, celle imaginée par Savary à la fin du XVIIe siècle. Mais Hall a su rendre cette machine automatique, ce qui a assuré le succès de son invention.

Nous retrouvons, en 1889, le pulsomètre à peu près tel que nous l'avions vu en 1878; quelques perfectionnements de détails ont été apportés à sa construction. C'est toujours un instrument rustique, n'ayant besoin d'aucune fondation, qui peut être descendu dans un puits au bout d'une chaîne, très approprié, en un mot, aux conditions d'une installation provisoire.

Il est construit par diverses maisons, notamment par la Société de construction des Batignolles, de Paris, laquelle en présentait des spécimens variés et intéressants.

IMPRIMERIE NATIONALE.

SECTION II.

RÉCEPTEURS HYDRAULIQUES.

SOMMAIRE.

Généralités. — Caractères généraux des moteurs exposés. — Division.

Machines à colonne d'eau de Brotherhood, de Mégy, de Samain.

Roues hydrauliques. — Usine de Pont-Vincent, par Brault, Teisset et Gillet.

Turbines. — Questions générales. — Turbines à chute modérée de Feray, de Brault, Teisset et Gillet, de Royer, de Leprince. — Distribution d'eau de Genève, turbines d'Escher Wyss. — Turbines à haute chute d'Escher Wyss, de la Société alsacienne, de Rieter, de la Société Électricité et Hydraulique.

Les récepteurs hydrauliques sont des machines qui utilisent les chutes d'eau naturelles et transforment la puissance de ces chutes en travail industriel.

Les chutes d'eau représentent l'énergie d'une partie de la chaleur envoyée par le soleil à notre globe; elles constituent une des formes nombreuses sous lesquelles la nature met cette énergie à notre portée. Il semble, au premier abord, que le travail de ces chutes d'eau soit immédiatement utilisable, puisqu'il consiste en un poids tombant d'une certaine hauteur. Et l'on entend bien souvent regretter que le travail énorme représenté par ces masses d'eau, qui tombent de hauteurs souvent très grandes, ne soit pas mieux utilisé. On s'étonne que l'on continue à brûler du charbon sous les chaudières des machines à vapeur, alors que nous avons à notre disposition une puissance, pour ainsi dire, illimitée et gratuite. Un courant tel que celui du Rhône développe incessamment, entre la source et l'embouchure du fleuve, plusieurs millions de chevaux-vapeur. Ce travail immense n'a d'autre effet, aujourd'hui, que de dégager un peu de chaleur, immédiatement dispersée, de charrier les débris des montagnes, de les broyer, de les user et, finalement, d'en encombrer le lit du fleuve et le fond de la mer.

C'est là un des sujets sur lesquels l'imagination des inventeurs s'est donné le plus librement carrière, pour mettre au jour des projets gigantesques et des propositions séduisantes.

Malheureusement, lorsqu'on regarde les choses de plus près et qu'on s'avise d'en arriver aux chiffres, ces espoirs ambitieux s'amoindrissent singulièrement. En fait, une fraction extrêmement minime est utilisée de la puissance motrice représentée par les chutes d'eau naturelles Et il y a, de cette sorte d'abandon, des raisons fort valables et bien connues de tous ceux qui ont étudié la question.

En premier lieu, cette puissance est loin d'être gratuite. En dehors du récepteur proprement dit, machine assez dispendieuse par elle-même, il faut compter avec

l'aménagement de la chute. Or, sauf circonstances locales tout à fait favorables, ce aménagement exige des travaux considérables et coûteux. Ce n'est pas, en effet, sans des dépenses élevées que l'on peut établir des barrages de retenue, des ouvrages régulateurs, des canaux d'amenée et de fuite, etc.

Mais même dans les cas où ces travaux n'entraînent que des dépenses modérées, il arrive bien souvent qu'il faut renoncer à se servir de la force hydraulique, parce qu'elle est plus ou moins irrégulière. C'est qu'en effet le cours d'eau à utiliser peut être exposé à des crues, à des embâcles de glace ou à des sécheresses, qui constituent autant de chômages prolongés, que bien peu d'industries peuvent accepter.

L'emplacement d'une usine est ordinairement imposé par des conditions, naturelles ou commerciales, qui sont loin de s'accommoder avec les conditions techniques du cours d'eau. Dès lors, entre le moteur hydraulique et l'atelier à mettre en mouvement, il faut une transmission de travail, plus ou moins longue, plus ou moins coûteuse, et fréquemment impossible à établir.

Dans les pays de la vieille Europe, l'utilisation d'une chute d'eau se heurte souvent à des obstacles d'une nature toute différente. Dans nos contrées, où la population est dense, il arrive que les divers intérêts, publics ou privés, s'entremêlent, s'enchevêtrent, se combattent. De là, ces difficultés administratives ou contentieuses, qui sont presque d'ordre normal, chaque fois qu'on touche à un cours d'eau, et contre lesquelles tous les efforts sont impuissants.

Il ne faut donc pas s'étonner de voir l'industrie abandonner les forces hydrauliques et s'adresser à la machine à vapeur, si simple, si souple, si docile, si peu encombrante, que chacun peut avoir chez soi, et qui n'a besoin que d'un peu de charbon pour rendre tous les services qu'on lui demande.

Tel était l'état de la question il n'y a pas bien longtemps; et à l'Exposition de 1878, on pouvait constater que les moteurs hydrauliques étaient tombés dans une sorte de défaveur.

Mais les conditions de l'industrie sont susceptibles de transformations; il semble aujourd'hui que les récepteurs hydrauliques tendent à se relever de leur discrédit, et à reprendre une place importante. Parmi les causes qui paraissent avoir contribué à ce résultat, il faut compter, en première ligne, le développement intense qu'ont pris, dans ces dernières années, les industries électriques. L'électricité intervient ici de deux manières :

En premier lieu, elle permet de transporter l'énergie à grande distance et beaucoup plus économiquement que les transmissions mécaniques. Un conducteur électrique ne coûte pas très cher, il absorbe peu d'énergie, il se prête avec une extrême souplesse aux accidents de terrain. Dès lors, l'usine n'est plus rivée, pour ainsi dire, à la chute d'eau et cette indépendance relative est bien souvent précieuse.

En second lieu, il s'est créé certaines industries qui consomment des quantités énormes d'énergie et pour lesquelles, par conséquent, la dépense de charbon attein-

drait des chiffres inacceptables. Telles sont les industries de l'éclairage électrique et celles du traitement des métaux par l'électricité.

Lorsque le courant est obtenu à l'aide de moteurs à vapeur, il coûte cher et la lumière qu'il donne est véritablement une lumière de luxe. Lorsque, au contraire, on dispose d'une bonne chute d'eau pour actionner les dynamos, l'éclairage électrique ajoute à tous ses avantages celui d'une grande économie et peut être mis à la portée des bourses modestes.

Les usines qui traitent les minerais par l'électricité ne pourraient subsister, si les courants extrêmement intenses qu'elles emploient ne leur étaient fournis à très bas prix. Elles s'installent en conséquence à proximité d'une chute hydraulique puissante, qui leur fournit l'énergie qu'elles consomment.

Les circonstances locales jouent un rôle de premier ordre dans les frais d'aménagement des chutes d'eau. En général, ces frais sont considérables, lorsque le débit est grand et la chute faible; les chutes de grande hauteur sont, au contraire, bien moins coûteuses à installer. Aussi est-ce dans les pays de montagne que les moteurs hydrauliques de grande puissance tendent à se développer. A ce point de vue, c'était en 1889 l'exposition de la Suisse qui tenait le premier rang. C'est dans ce pays, pauvre de sol, dénué de charbon, mais riche par le travail, l'intelligence et l'esprit de suite, et pourvu de cascades nombreuses et de cours d'eau à forte pente, que la *houille blanche* est le plus largement utilisée. En matière d'hydraulique, l'exposition américaine était moins importante. Il faut d'autant plus le regretter, que l'industrie des États-Unis sait, au besoin, tirer le plus heureux parti des puissantes chutes d'eau qui se rencontrent sur le territoire. Il suffira de mentionner la cascade du Niagara, qui, dans un délai peu éloigné, va devenir le centre de production d'une puissance motrice pour ainsi dire illimitée.

Nous venons de rappeler les facilités particulières que présente d'ordinaire l'aménagement des chutes de grande hauteur. L'Exposition de 1889 était remarquable à ce point de vue; l'une des caractéristiques des moteurs hydrauliques qui y figuraient était précisément leur adaptation aux fortes pressions. Outre l'économie dans l'établissement des canaux d'amenée, les hautes chutes présentent des avantages qui, dans beaucoup de cas, deviennent décisifs. Le plus souvent, le captage et l'amenée des eaux peuvent se faire sans apporter de troubles aux intérêts du voisinage. Les récepteurs, travaillant sous des pressions élevées, sont peu encombrants, légers et à mouvements rapides; ils présentent d'ailleurs des facilités particulières pour la mise en train, l'arrêt et le réglage. Mais ils exigent une construction correcte et soignée, et, à cet égard, l'Exposition en contenait de superbes modèles.

Dans un récepteur hydraulique, l'eau agit par son poids, par sa pression ou par sa vitesse.

Les récepteurs à poids sont plutôt représentés par les roues à allure lente, telles que les roues à augets ou la roue Sagebien. Les moteurs de ce genre, si utiles, si répandus,

et qui rendent de si précieux services, n'étaient représentés à l'Exposition que par quelques rares spécimens.

On voyait dans les galeries de la mécanique générale figurer quelques moteurs à pression, sous forme de *machines à colonne d'eau.*

Les récepteurs dans lesquels l'eau agit par sa vitesse sont les roues à allure rapide et les turbines. A l'Exposition de 1889, c'étaient les turbines qui présentaient des sujets d'étude les plus intéressants. Nous aurons à les examiner avec quelque détail.

Commençons par les machines à colonne d'eau.

L'origine des moteurs utilisant la pression de l'eau n'est pas très ancienne; c'est vers la fin du siècle dernier que l'on songea à s'en servir, et ils furent principalement appliqués à l'épuisement des eaux dans les mines. Nous avons déjà eu l'occasion de mentionner les appareils de ce genre étudiés par M. Roux. Ces sortes de machines se sont peu répandues, car on rencontre rarement, réunies sur un même point, les circonstances locales qui en légitimeraient l'emploi. Réduites à cette seule application, les machines à colonne d'eau demeurèrent assez peu en usage, jusqu'au jour où la pression hydraulique put être, non plus empruntée à des chutes naturelles, mais créée de toutes pièces, à l'aide de machines. Dès lors, l'eau comprimée n'est plus que le véhicule du travail; la puissance développée par le moteur principal est transmise par l'eau à un récepteur unique, ou répartie entre plusieurs récepteurs branchés sur la conduite de refoulement. Le système a été inventé, il y a une quarantaine d'années, par l'éminent ingénieur Armstrong, et reçut de son auteur de nombreuses et admirables applications. Il se propagea rapidement, et il est pratiqué pour les usages les plus variés. On se sert de l'eau comprimée pour actionner des appareils de levage, les lourds et puissants organes des forges; les travaux publics, les chemins de fer, les ports de mer, la marine, la guerre, l'emploient sur la plus large échelle pour leurs manœuvres.

Presque toujours, le récepteur est une machine à colonne d'eau; et, au fur et à mesure que les emplois de l'eau comprimée sont devenus plus fréquents et plus variés, l'étude des machines à colonne d'eau s'est assise et complétée.

Les premiers moteurs d'Armstrong, combinés en vue de l'élévation des fardeaux, étaient des machines à simple effet, dans lesquelles le piston ne faisait qu'une excursion pour chaque opération. Plus tard sont venues les machines à rotation, dans lesquelles le mouvement alternatif d'un piston fait tourner un arbre de couche, dont le mouvement peut se continuer indéfiniment.

Parmi ces moteurs, le plus grand nombre ont été combinés en vue d'un service absolument déterminé : tel est le cas des ascenseurs, des machines-outils, etc. Nous aurons l'occasion ultérieurement d'étudier ces applications spéciales; nous renverrons également à une autre partie du présent rapport l'étude des appareils destinés à produire l'eau comprimée ou à la distribuer. Pour le moment, nous nous bornerons à examiner quelques machines à rotation pouvant s'appliquer à des services variés.

Les moteurs de ce système sont, en général, constitués comme les machines à vapeur; ils comportent un piston sur lequel s'exerce la pression et qui parcourt un cylindre d'un mouvement alternatif; ce mouvement est communiqué, à l'aide d'une transmission mécanique, à un arbre à manivelle, qui le transforme en mouvement de rotation continu. La pression est, au moment voulu, donnée ou supprimée à l'aide d'une distribution. Le piston est à simple ou à double effet; souvent, plusieurs pistons sont attelés sur un arbre unique, de manière à assurer la régularité du moment moteur. Cependant, entre les moteurs à vapeur et les moteurs à eau sous pression, il y a des différences profondes, résultant des propriétés physiques des deux fluides. La vapeur est élastique, condensable et de faible densité; l'eau est incompressible et d'un poids spécifique élevé. Dans le moteur à eau, il ne saurait être question ni de détente, ni d'avances, ni surtout de compression. La vitesse du fluide doit toujours être fort modérée, sous peine d'engendrer des pertes de travail considérables. La distribution doit donc être faite à pleine admission, à plein échappement, et les orifices des lumières sont très larges. Le plus souvent, il est utile de ménager, à l'échappement et à l'admission, une très faible avance, de manière à parer aux petites défectuosités du montage. Il en résulte une petite perte d'eau; mais ce léger inconvénient est négligeable, en comparaison des graves avaries que pourraient amener les coups d'eau, pour peu que la distribution ne fût pas rigoureusement correcte.

Moyennant ces quelques précautions, on arrive à faire tourner ces moteurs à des allures comparables à celles des machines à vapeur. Comme, d'autre part, les pressions en usage sont en général fort élevées, le moteur est léger et peu encombrant.

Lorsqu'on a à sa disposition une canalisation d'eau sous pression, les moteurs de cette espèce sont d'une commodité extrême, surtout pour la petite industrie. Ils tiennent peu de place, on peut les installer n'importe où, ils ne font pas de bruit, ne répandent ni fumée, ni eau chaude, ni vapeur, ni odeur. Il suffit d'ouvrir ou de fermer un robinet pour les mettre en route ou les arrêter.

Toutefois, comme rendement, il faut bien reconnaître que, le plus souvent, ils laissent fort à désirer. Ce n'est pas qu'à ce point de vue une machine à colonne d'eau le cède, en principe, à n'importe quel autre moteur. Quand une pareille machine donne toute sa puissance, les pertes de travail se réduisent presque aux frottements, qui ne sont pas plus grands que dans une machine à vapeur. Mais dans les conditions ordinaires de l'industrie, cette marche à pleine pression peut être considérée comme un cas tout à fait exceptionnel. Lorsqu'on établit un moteur, on en calcule les dimensions d'après la plus grande résistance qu'il a à surmonter; mais, dans son service normal, le moteur travaillera toujours sur une résistance bien inférieure à ce maximum. S'il s'agit d'une machine à vapeur, par exemple, on règle la puissance sur la résistance à l'aide du papillon ou de la détente variable, de manière à réduire la dépense de fluide quand la résistance à surmonter vient à diminuer. En matière de machines à pression d'eau, on ne saurait agir de même. A chaque révolution de l'arbre, le cylindre se remplit et

se vide entièrement, c'est-à-dire que le volume du liquide consommé est absolument le même, et la dépense d'eau reste constante. L'excès du travail maximum sur le travail actuel est entièrement perdu et se disperse en frottements, soit des organes solides, soit du liquide lui-même. C'est comme si, dans un atelier mû par une machine à vapeur, on faisait toujours travailler la machine à toute sa puissance, en absorbant à l'aide d'un frein l'excès de travail moteur.

Dans ces conditions, le rendement, c'est-à-dire le rapport de la puissance de la chute à la puissance utilisée, est nécessairement défectueux, et d'autant plus faible que les résistances varient dans des limites plus étendues.

Ces principes posés, la description des moteurs à colonne d'eau, machines d'une construction d'ailleurs assez simple, ne demandera pas des développements bien étendus.

La machine Brotherhood, établie par M. Brotherhood (Peter), de Londres, et construite par plusieurs maisons, est bien connue et ne nécessite pas une ample description. Elle se compose de trois cylindres à simple effet, qui convergent vers une manivelle unique, avec distributeur tournant avec l'arbre. Cette machine, qui peut marcher à des allures vives, constitue une combinaison mécanique fort bien étudiée. Elle a reçu de nombreuses applications, surtout pour les outils tournant vite, tels que les pompes centrifuges, les outils à bois, etc.

La maison Sautter-Lemonnier construit de jolis moteurs hydrauliques à piston, étudiés par M. Mégy, avec commande de l'arbre tournant par cylindre oscillant. L'un des types est à deux cylindres conjugués et donne, à la vitesse normale de 160 tours et sous une chute de 100 mètres, une puissance de 100 chevaux-vapeur à pleine marche.

M. Samain, de Paris, s'est posé le problème dont nous avons ci-dessus indiqué les termes. Il a cherché à établir un moteur à pression hydraulique, dans lequel la dépense d'eau variât en même temps que le travail résistant. La solution à laquelle il s'est arrêté est extrêmement ingénieuse et élégante.

Imaginons un moteur hydraulique agissant sur une manivelle, par trois ou quatre pistons disposés en éventail, suivant l'agencement Brotherhood. Pour une pression déterminée de l'eau motrice, l'effort tangentiel exercé sur la manivelle sera sensiblement constant. Comme cet effort ne peut être modifié, M. Samain a eu l'idée d'agir sur le rayon de la manivelle. A cet effet, cette manivelle est constituée par deux pièces articulées entre elles. Suivant que l'angle que ces pièces font entre elles est plus ou moins ouvert, le bras de levier du moment moteur varie de longueur. Les choses sont arrangées de telle sorte que cet angle varie de lui-même avec l'effort à exercer, et que le moment moteur soit à chaque instant égal au moment résistant. On voit que, si la

résistance augmente, le bras de levier augmentera proportionnellement. Il en sera donc de même de la course des pistons et, par suite, de la dépense d'eau comprimée.

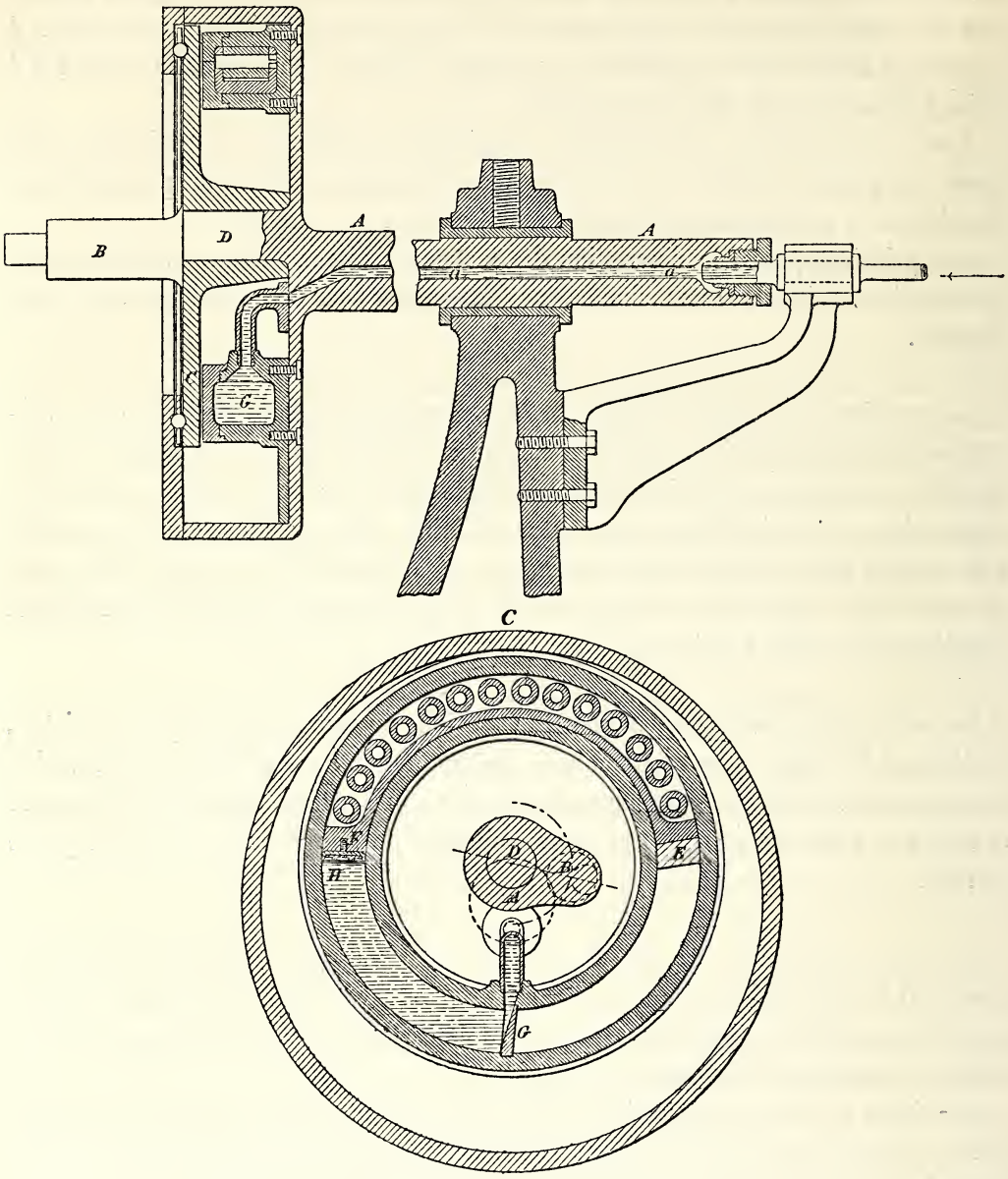


Fig. 212. — Moteur Samain.

La figure 212 explique ce mécanisme : *AA* est l'arbre principal, sur lequel s'exerce la résistance à surmonter; ce sera, par exemple, l'arbre d'un treuil. Sur le bouton de manivelle *B* viennent agir quatre pistons hydrauliques. Ce bouton est fixé au plateau *CC*, lequel peut tourner autour de la soie excentrée *D*, laquelle est solidaire de l'arbre *AA*. Le bras de levier moteur est représenté par la distance *AB* (coupe transversale),

laquelle varie en même temps que l'angle *ADB*. Sur le plateau *CC* est fixé un arrêt *E*, qui vient par la tige courbe *EF*, concentrique à *D*, agir sur le piston *F*. Ce piston reçoit, sur son autre face, une pression constante, qui lui est transmise par de l'eau comprimée arrivant par un canal *aa*, percé suivant l'axe de l'arbre *AA* et pénétrant dans la conduite courbe *GH*, laquelle remplit, par rapport au piston *F*, l'office de cylindre.

Les proportions de l'appareil sont établies de telle sorte que les forces qui s'exercent en *B* et en *F* se fassent à peu près équilibre autour du bouton *D*. Sous l'action de la force appliquée en *B*, l'angle *ADB* va s'ouvrir, en refoulant le piston *F*; le bras *AB* va donc grandir, jusqu'à ce que le moment autour de *A* de la force appliquée en *B* l'emporte sur le moment résistant appliqué sur l'arbre *A*. Puis le mouvement de rotation continuera autour de *A*, l'angle *ADB* ne changeant pas tant que la résistance sera elle-même constante. Si la résistance augmente, l'angle *ADB* s'ouvrira et la dépense d'eau augmentera. Les effets inverses se produiront dès que la résistance viendra à diminuer.

Tel est cet appareil curieux et original; quoique d'invention toute récente, il a déjà reçu quelques applications et fonctionne fort régulièrement. L'idée est ingénieuse et fait honneur à M. Samain, qui n'en est pas d'ailleurs à son coup d'essai, et dont le nom est bien connu de tous ceux qui s'occupent d'hydraulique. Nous le retrouverons plus d'une fois dans la suite de ce rapport.

A en juger par ce que l'on voyait dans les galeries de l'Exposition, il semblerait que les roues hydrauliques soient à peu près abandonnées; il n'en est rien cependant. Pour les chutes de hauteur modérée, la modeste roue soutient encore la lutte contre la turbine; elle ne lui cède en rien comme rendement, et l'emporte dans les cas nombreux où l'on n'a pas sous la main de mécanicien exercé.

La maison Brault, Teisset et Gillet, de Chartres, expose, dans la section de l'agriculture, les modèles d'une installation faite à Pont-Vincent (Drôme), pour l'alimentation du canal de Pierrelatte. Le volume d'eau à fournir est de 400 litres par seconde, et la hauteur d'élévation est de 2 mètres; la puissance motrice est fournie par une chute de hauteur variable entre 0 m. 75 et 1 m. 30. La solution adoptée est simple et rationnelle. Le système se compose de deux roues Sagebien, l'une motrice, l'autre élévatoire, dont les axes sont parallèles et conjugués par un engrenage. Voici les principales dimensions :

	Roue motrice.	Roue élévatoire.
Diamètre extérieur	5,000 millim.	5,000 millim.
Largeur	3,000 —	1,850 —
Hauteur des aubes	1,260 —	900 —
Nombre d'aubes	48	48
Nombre de tours par minute	3,005	2,067

Nous arrivons aux moteurs dans lesquels l'eau agit, non plus à l'état statique, comme

dans les roues lentes ou les machines à piston, mais en vertu de sa vitesse. Cette action se divise en deux temps : dans le premier, l'eau est poussée par la pression à travers des orifices, en prenant la vitesse correspondant à la hauteur de chute; ces orifices constituent le *distributeur*. Dans le deuxième temps, l'eau, animée d'une vitesse plus ou moins grande, est reçue par le *récepteur* proprement dit, lequel prend, en général, la forme d'une roue munie d'aubes courbes.

Le système peut être réalisé de bien des façons. Les dispositifs employés à cet effet sont généralement rangés en deux classes : les roues et les turbines. Cette distinction, autrefois parfaitement légitime, a perdu quelque chose de sa valeur; car, parmi les appareils que l'on désigne sous le nom de *turbines*, il en existe aujourd'hui qui se rapprochent, par plus d'un point, des roues proprement dites. Quoi qu'il en soit, nous n'avons pas à nous occuper ici des roues à allure rapide, qui étaient insuffisamment représentées à l'Exposition, et nous passerons tout de suite aux turbines.

Depuis que Burdin a déterminé les principes auxquels doit satisfaire une turbine, pour constituer un bon outil industriel; depuis que Fourneyron a su établir des turbines fonctionnant régulièrement et à rendement élevé, ces sortes de machines se sont rapidement répandues dans la pratique. Elles présentent, en effet, des avantages précieux. Elles s'appliquent également bien à toutes les hauteurs de chute, depuis quelques décimètres jusqu'à des centaines de mètres. Elles utilisent à un haut degré le travail brut disponible. Leur vitesse de rotation est beaucoup plus grande que celle des roues hydrauliques, ce qui simplifie beaucoup les transmissions. Cette vitesse peut d'ailleurs être variée, dans des limites étendues, par une construction et des tracés convenablement établis. Pour une turbine donnée, la puissance peut être largement augmentée ou diminuée, sans que le rendement soit notablement affecté. Enfin la turbine est bien moins encombrante que la roue.

Les principes qui président à la construction des turbines n'ont pas varié. Ils se résument dans cet adage : pour obtenir d'un pareil récepteur un rendement satisfaisant, il faut que l'eau y entre sans choc et en sorte sans vitesse. Ces principes ont été développés par un grand nombre de savants illustres, qui ont employé, pour ces recherches, les procédés mathématiques les plus élevés. Toutefois, on ne saurait dire que, dans ces dernières années, la question théorique ait fait des progrès bien importants.

Pour ce qui concerne les dispositions d'ensemble, on s'en est tenu pendant fort longtemps à deux types : la turbine *centrifuge*, du système Fourneyron, inventée en 1832, et dans laquelle les filets liquides circulent du centre à la circonférence; et la turbine *parallèle*, construite par Fontaine, en 1839, dans laquelle les filets restent à une distance à peu près constante de l'axe de rotation. Dans ces deux machines, cet axe est vertical. Ces machines furent améliorées dans leur construction; on créa des variétés nombreuses; mais les caractères fondamentaux restèrent longtemps immuables.

Parmi les innovations importantes apportées aux turbines, il convient de rappeler celles dues à l'initiative de Girard. C'est à cet hydraulicien éminent que l'on doit le principe de la libre déviation des filets fluides, qui étend largement les limites entre lesquelles le rendement reste élevé, malgré les variations du travail. Ce fut lui également qui construisit des turbines à axe horizontal, et imagina un dispositif heureux, qui a donné lieu à de nombreuses applications : l'injection partielle de l'eau motrice. En réduisant, à une faible amplitude, la longueur de l'arc suivant lequel le récepteur reçoit l'action du fluide moteur, il se procurait une très grande liberté pour modifier la vitesse de rotation, suivant la nature des outils à conduire et la quantité d'eau disponible.

Après avoir sommeillé pendant d'assez longues années, la question des turbines semble aujourd'hui reprendre faveur. Ces machines étaient représentées, dans les galeries du Champ-de-Mars, d'une façon fort honorable. Toutefois cette Exposition, si intéressante qu'elle apparût, était loin de correspondre aux développements importants qu'a pris la construction des turbines dans certains pays, et notamment aux États-Unis. Les Américains, avec l'esprit d'initiative qui caractérise leurs conceptions, ont su, tout en respectant les principes fondamentaux, s'affranchir des formules un peu rigides auxquelles étaient soumis les types classiques, et adopter des dispositions originales, répondant mieux aux conditions à satisfaire. C'est ainsi qu'à côté des turbines parallèles et centrifuges, ils construisent des turbines *centripètes,* dans lesquelles l'eau circule de l'extérieur vers l'axe, et des turbines *composées,* combinant entre elles les caractères distinctifs des trois genres ci-dessus. De même, pour les très hautes chutes, ils ont imaginé des machines qui rappellent, par leurs formes générales, les antiques roues à réaction, mais qui en diffèrent complètement par un point essentiel, à savoir un rendement fort élevé. C'est par une application à la fois délicate et audacieuse des principes de l'hydraulique qu'ils ont ainsi tiré, d'un appareil fort défectueux, une machine excellente. Entre leurs mains, la turbine s'est assouplie, industrialisée; elle se prête aux conditions les plus variées et aux services les plus divers. L'Exposition ne donnait qu'un lointain reflet de ces transformations profondes.

Nous avons dit, que la turbine s'accommode également des chutes d'eau de faible ou de grande hauteur; mais la construction n'est pas la même dans l'un et l'autre cas. Dans les descriptions qui vont suivre, nous étudierons d'abord les turbines pour chute modérée; nous passerons d'ailleurs rapidement, car les appareils exposés représentaient des types classiques et bien connus.

MM. Feray et Cie, d'Essonnes, ont établi, de concert avec M. Meunier, une usine pour l'alimentation d'eau de la ville de Nogent-sur-Seine. Nous avons donné précédemment une description de cette usine, nous n'y reviendrons pas.

L'un des types de turbine les plus répandus, la turbine parallèle, est dû, comme on l'a vu, à l'ingénieur Fontaine, qui contribua pour une large part à répandre l'usage

du nouveau moteur. L'établissement, fondé à Chartres par Fontaine, s'est consacré à la construction des moteurs hydrauliques. Il n'a cessé d'apporter au type primitif de nouveaux perfectionnements. Il est actuellement entre les mains de MM. Brault, Teisset et Gillet, qui soutiennent dignement la réputation de l'ancienne firme.

La figure 213 représente la turbine Fontaine telle qu'elle est construite aujourd'hui par la maison Brault, Teisset et Gillet. *AA* est le récepteur mobile, *BB* le distributeur.

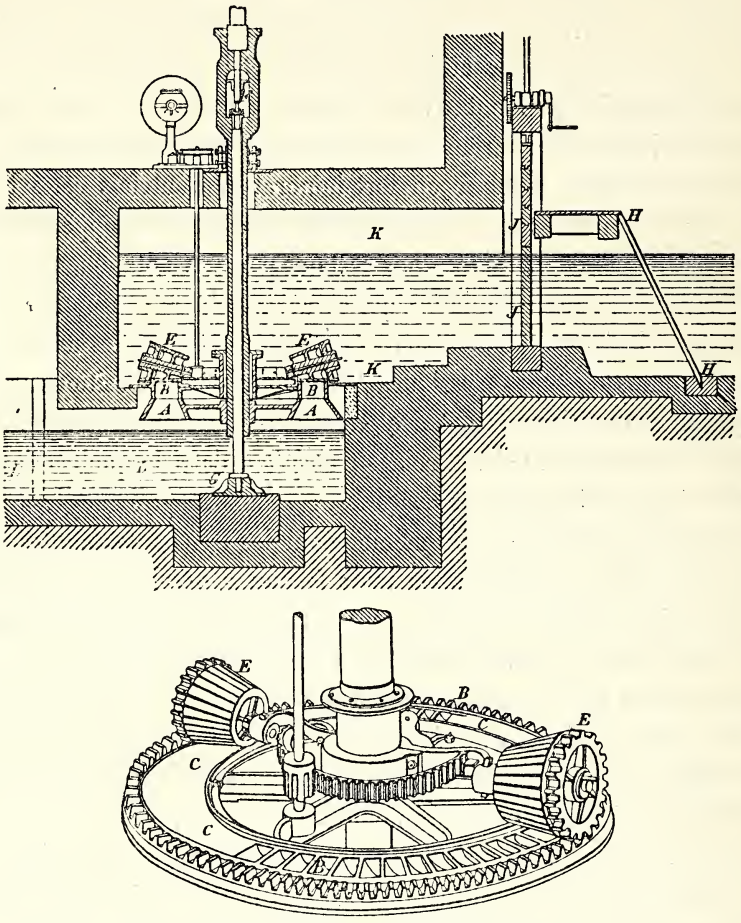


Fig. 213. — Turbine Fontaine.

Le vannage *CC*, qui permet de fermer, à volonté, un certain nombre des orifices livrant passage à l'eau, est constitué par deux bandes de cuir flexibles, raidies par des tasseaux dans le sens radial. Ces obturateurs, symétriques par rapport au centre de la turbine, s'enroulent sur deux cônes *E*, *E*, manœuvrables de l'extérieur à l'aide d'un train d'engrenages. L'arbre auquel est fixé le récepteur est creux; il repose, par un pivot *F*, sur le haut d'une colonne *FG*, assemblée sur un fort patin *G*; le pivot *F* est à graissage et rappel. La figure indique le mode d'installation de ces turbines. L'eau du bief supérieur, après avoir traversé un grillage *HH* et une vanne de garde *JJ*, arrive dans

la chambre *KK* de la turbine; elle traverse le moteur, pour s'écouler ensuite dans le canal de fuite *LL*.

Sur beaucoup de cours d'eau, le débit varie en sens inverse de la chute. Lors des basses eaux, en été, la chute est maxima; dans la saison des pluies, elle diminue à mesure que le débit augmente. En pareil cas, on fait souvent usage d'une turbine à double couronne concentrique. La figure 214 représente le distributeur d'une pareille turbine; le récepteur a une forme analogue. En basses eaux, on ne livre au passage de l'eau que la couronne extérieure; quand l'eau est abondante, on se sert des deux couronnes, de manière à conserver, en toute saison, à peu près la même puissance. MM. Brault, Teisset et Gillet exposent une turbine de ce genre, faite pour donner 25 chevaux, soit avec la couronne extérieure seule, sous un débit de 1,700 litres par seconde et une chute de 1 m. 50; soit avec les deux couronnes, un débit de 3,600 litres et une chute réduite

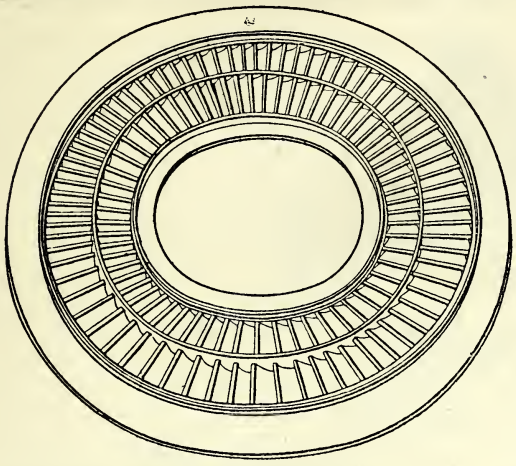


Fig. 214. — Turbine à double couronne.

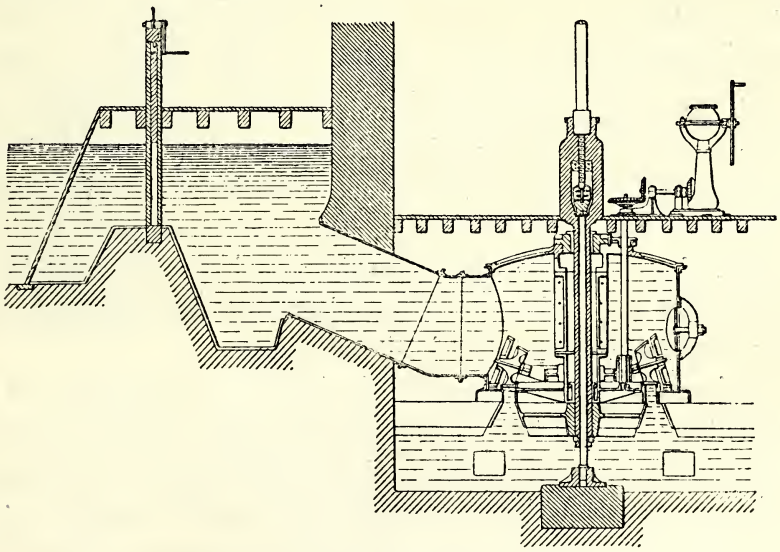


Fig. 215. — Turbine Fontaine avec bâche.

à 1 mètre. Il va de soi qu'un vannage à cône peut être appliqué à chacune des couronnes.

Pour les chutes de plus grande hauteur, où la chambre de la turbine prendrait des dimensions exagérées, l'installation se fait ainsi que le représente la figure 215.

L'appareil est entouré d'une bâche en tôle, se raccordant avec le bief supérieur par une large conduite, également en tôle. Le modèle exposé est destiné à desservir une chute de 10 mètres, pour une puissance de 30 chevaux. Le diamètre de la turbine est de 1 m. 20, et l'allure normale de 68 tours à la minute.

Enfin la maison Brault, Teisset et Gillet expose une petite turbine domestique

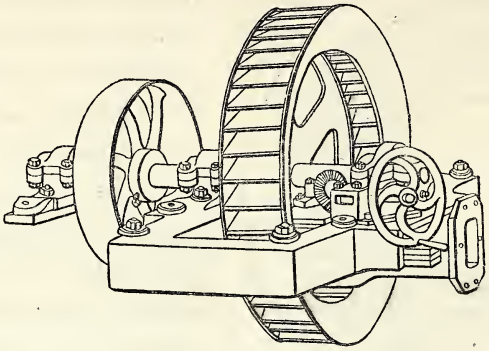


Fig. 216. — Petite turbine Girard.

(fig. 216) qui donne 2 chevaux sous une chute de 12 mètres. C'est une turbine Girard, à axe horizontal et injection partielle. Les principales dimensions sont :

Diamètre moyen,	700 millim.
Orifices de l'injecteur	60 × 10.5
Nombre des orifices	5
Nombre de tours par minute	190

M. François Royer, constructeur à Épinal, expose une magnifique turbine de 130 chevaux; cette machine (fig. 217) est du type parallèle, avec application de la libre déviation imaginée par Girard. Entre autres particularités qu'elle comporte, il convient de signaler le système de vannage, au moyen duquel on peut faire varier à volonté le débit. C'est là une des difficultés sérieuses qui se sont rencontrées en application; elle a suscité un grand nombre d'inventions, mais l'on ne peut dire qu'elle ait été, jusqu'ici, surmontée de façon tout à fait satisfaisante.

Dans les anciennes turbines, on modifiait le débit en étranglant plus ou moins les orifices distributeurs. Malgré tous les soins apportés dans les tracés, on ne pouvait éviter les frottements et remous parasites, et le rendement s'en trouvait grandement affecté. On fut ainsi amené à obturer complètement un certain nombre d'orifices, en laissant les autres complètement ouverts. Mais cette manœuvre est loin d'être facile, et les procédés employés pour la réaliser ne sont pas irréprochables. Nous avons décrit les lanières obturatrices de MM. Brault, Teisset et Gillet. M. Royer a recours à un autre artifice. Chaque orifice du distributeur est fermé par une plaque en fonte, sorte de clapet capable de s'ouvrir en tournant autour d'une de ses arêtes. Chaque clapet porte un ergot sur lequel peut venir mordre un sabot monté sur une couronne mobile

concentrique à la turbine. Si l'on fait tourner dans un sens convenable la couronne mobile, le sabot soulève les clapets les uns après les autres, et ceux-ci se tiennent ouverts par l'effet de l'écoulement de l'eau. Si la couronne tourne en sens inverse, le

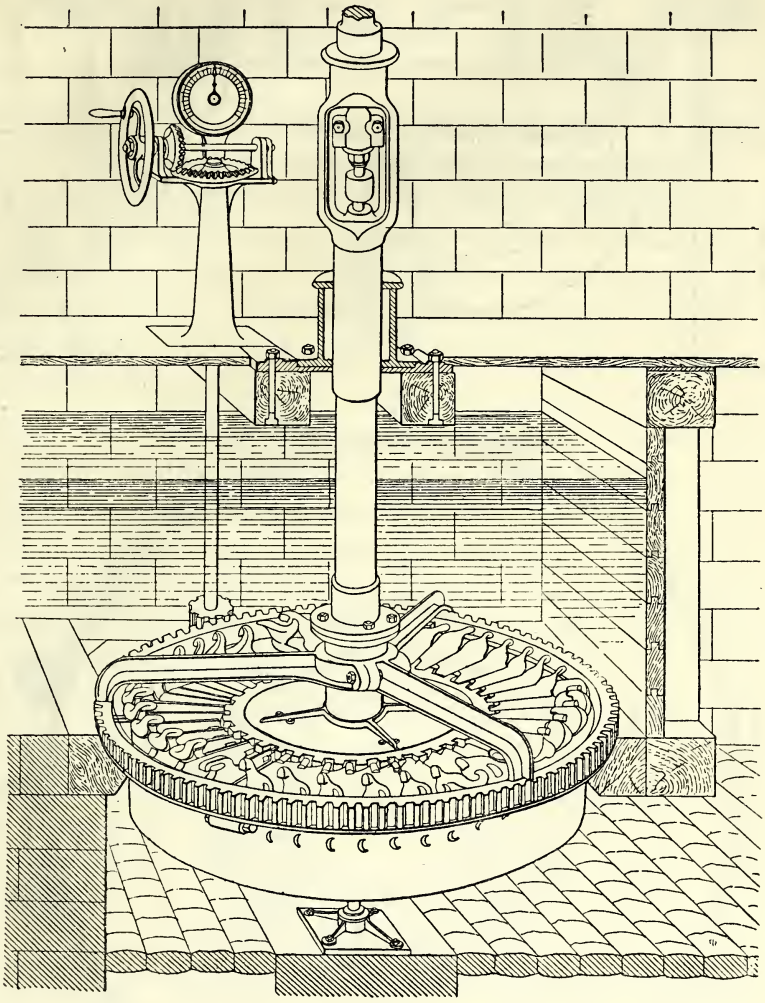


Fig. 217. — Turbine Royer.

sabot vient, au contraire, rabattre les clapets et fermer l'un après l'autre les orifices Sur la même couronne sont montés ordinairement plusieurs sabots équidistants, de manière à assurer la distribution symétrique des actions.

Ce système ingénieux fonctionne correctement; il a été imaginé par M. Joly, ingénieur de M. Royer. Toute la machine est fort bien étudiée et d'une belle construction.

Le même problème que ci-dessus a été résolu par M. Leprince, de Paris, d'une façon toute différente. Le distributeur *AB* (fig. 218) est divisé en quatre quadrants : deux quadrants opposés *A*, *A* reçoivent l'eau par-dessus; les deux autres quadrants *B*, *B*

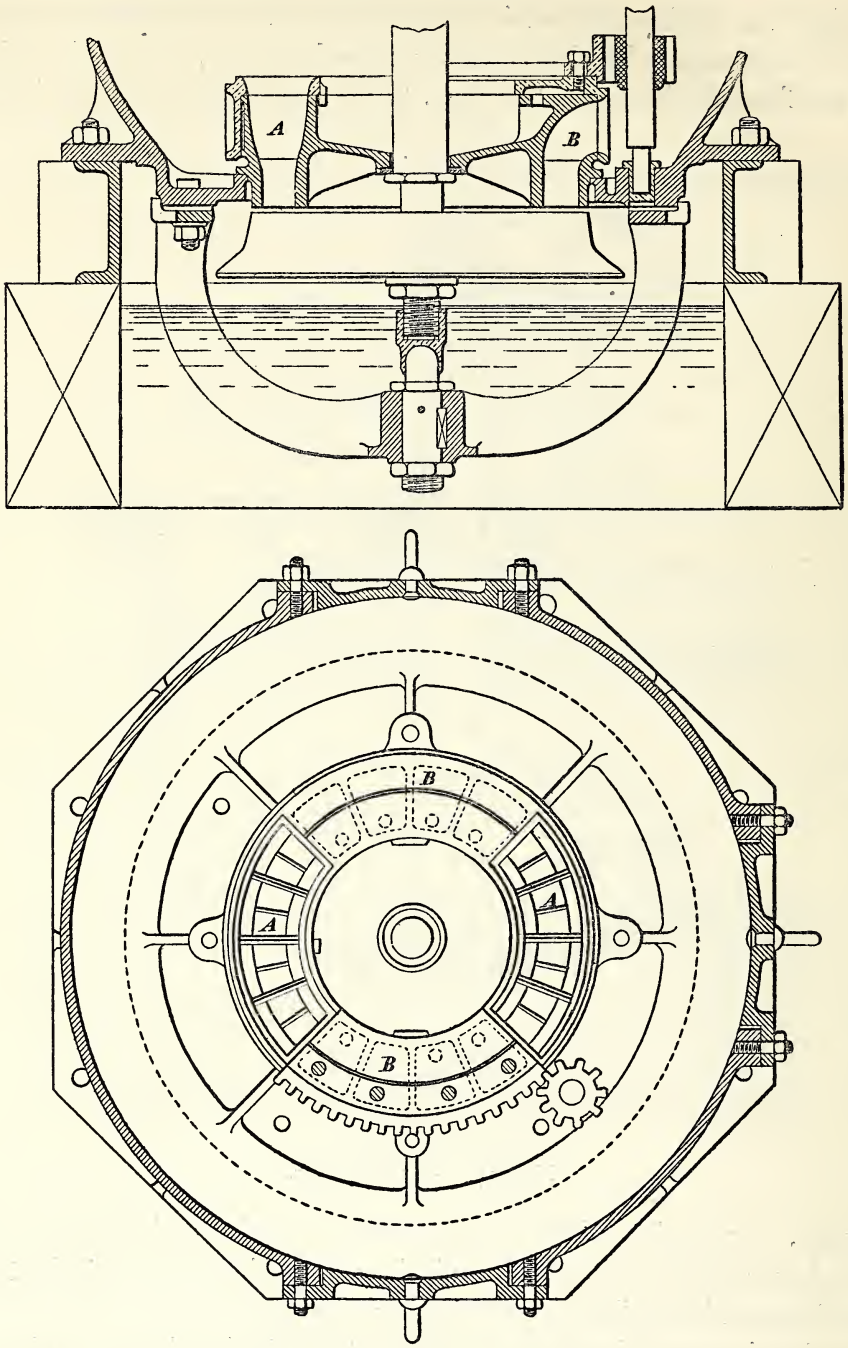


Fig. 218. — Turbine Leprince.

reçoivent l'eau par côté. Le vannage des quadrants *A* est formé d'une paire de plaques, en forme de secteurs, embrassant également des arcs opposés de 90 degrés; celui des quadrants *B* est composé de deux quarts de cylindre disposés de même. L'ensemble du vannage est solidaire d'une couronne dentée, qu'on peut faire tourner d'un angle

plus ou moins grand à l'aide d'un engrenage. Le jeu de l'appareil se comprend facilement. On y reconnaît ces avantages, que tous les orifices peuvent être ouverts à la fois, et que, lorsqu'ils sont partiellement fermés, l'obturation est symétrique par rapport à l'axe de la turbine.

Un des exemples les plus grandioses de l'alimentation à l'aide de chutes d'eau est l'établissement du service de distribution des eaux et de la puissance motrice dans la ville de Genève.

La ville de Genève possédait une distribution d'eau restreinte qui, en 1883, empruntait sa force motrice à une roue hydraulique établie à la queue du lac Léman et à deux machines à vapeur. La puissance ainsi réalisée était d'environ 500 chevaux.

Conformément aux projets étudiés par MM. Turettini et Merle d'Aubigné, ingénieurs des travaux de la ville, le Conseil municipal, par une délibération du 30 octobre 1883, décida d'élever une grande usine, mue par les eaux du Rhône. Cette usine devait être affectée à l'élévation des eaux pour alimenter, non seulement les services privé et public, mais aussi une distribution de puissance motrice. Le projet comporte l'aménagement complet du lit du fleuve dans la traversée de la ville, des ouvrages régulateurs, et enfin une immense usine élévatoire, devant développer une puissance brute de 6,000 chevaux. Le travail est recueilli par 20 turbines, chacune de 300 chevaux bruts. La distribution est faite par deux canalisations, l'une sous une pression de 50 mètres, l'autre sous une pression de 150 mètres d'eau.

Les travaux furent immédiatement commencés; 5 turbines étaient mises en service en 1886; il y en a aujourd'hui 8 en exploitation, représentant 2,400 chevaux bruts.

Toute la machinerie, turbines, pompes, transmissions, etc., a été fournie et mise en place par la maison Escher, Wyss et Cie, de Zurich.

La chute est variable, comme volume et comme hauteur, chaque turbine devant débiter par seconde :

Pour une chute de 3 m. 70, un volume de..... 6,000 litres.
Pour une chute de 1 m. 68, un volume de..... 13,350

ce qui donne, dans ces deux cas extrêmes, une puissance brute de 300 chevaux.

Pour répondre à ces variations étendues, on a eu recours à des turbines à trois couronnes; en voici les principales dimensions :

DÉSIGNATION.	COURONNE		
	EXTÉRIEURE.	MOYENNE.	INTÉRIEURE.
	millimètres.	millimètres.	millimètres.
Diamètre extérieur	4,200	3,640	2,700
Diamètre intérieur	3,640	2,700	1,750
Largeur	280	470	475

IMPRIMERIE NATIONALE.

La couronne extérieure est toujours ouverte en grand; son distributeur fixe reçoit l'eau par-dessus. Pour les deux autres couronnes, l'admission au distributeur se fait, moitié par-dessus, moitié latéralement, avec vannages par quadrants, suivant un système que nous avons déjà eu l'occasion de décrire.

Chaque turbine commande, à l'aide d'une manivelle montée sur son axe, deux pompes Girard à double effet, rectangulaires entre elles.

L'eau motrice livrée aux industriels est utilisée de diverses manières. Pour les petites puissances, on emploie le moteur Schmid, machine à colonne d'eau à cylindre oscillant. Les industries qui absorbent beaucoup de travail donnent la préférence à de petites turbines, dont nous aurons à étudier des spécimens.

Les payements ont lieu, au choix des preneurs, soit au volume consommé, soit à la puissance; les tarifs décroissent quand la consommation augmente. Ainsi, le tarif au volume comporte des prix au mètre cube de 9.6 centimes, à 3.1 centimes pour des consommations annuelles de 200 à 8,000 mètres cubes. Pour le tarif à la puissance, on compte, pour une marche de dix heures par jour, de 585 à 139 francs, par cheval et par an, suivant que la puissance varie de 1 à 100 chevaux.

En 1889, la fourniture de la puissance motrice a procuré 29 p. 100 de la recette totale de la distribution; la puissance consommée a été de 1,386 chevaux, répartie entre plus de 200 récepteurs.

Le succès de cette grande et remarquable entreprise est, comme on le voit, assuré dès maintenant. La distribution du travail par l'eau sous pression présente des commodités spéciales. Le moteur ne fait pas de bruit, ne tient pas de place, n'a presque pas besoin de surveillance, n'est soumis à aucune sujétion de voisinage ou administrative, part et s'arrête à volonté. La combinaison des deux tarifs adoptés par la ville de Genève est des plus heureuses. Elle permet au consommateur de choisir le prix qui lui est le plus avantageux, suivant que le travail qu'il a à demander au moteur est permanent ou intermittent. La solution est admirablement adaptée aux circonstances locales : puissance hydraulique considérable, très régulière et facile à aménager à peu de frais, grand nombre de petites industries groupées dans un périmètre d'étendue médiocre. Il faudrait se garder d'induire, de cet exemple, qu'un pareil succès serait partout réservé à une entreprise analogue, à moins que les conditions ne soient aussi favorables, ce que l'on peut considérer comme exceptionnel.

La description de cette remarquable installation nous conduit tout naturellement à celle des moteurs hydrauliques qu'elle est appelée à desservir. Elle servira de transition à l'étude des turbines travaillant sous haute pression, qui aujourd'hui sont fort en usage pour recueillir le travail emprunté à une canalisation d'eau.

Quelle que soit la chute à laquelle on ait affaire, les principes qui président au tracé des turbines sont toujours les mêmes. Mais les formes sous lesquelles ces principes sont à appliquer sont bien différentes suivant les cas. A une grande hauteur de chute correspondent un faible débit et une grande vitesse des filets liquides à leur

sortie des orifices du distributeur; c'est dire que la section d'écoulement offerte par ces orifices doit être petite. D'autre part, la vitesse circonférencielle de la turbine, qui, pour un bon rendement, est nécessairement comparable à celle des filets fluides, devient elle-même fort grande. Lorsqu'on essaye de dessiner une turbine à grande chute comme une turbine à chute modérée, en faisant affluer l'eau par tout son pourtour, on est forcément conduit, par les conditions ci-dessus rappelées, à lui donner un diamètre très petit et une rotation très rapide. On a quelquefois établi des turbines d'après ces données. Mais, en général, il y a avantage à avoir des outils moins minimes comme dimensions et tournant à des allures moins exagérées. On est ainsi amené à la solution adoptée par Girard, c'est-à-dire à n'injecter l'eau que par un arc restreint de la circonférence.

La turbine Girard à injection partielle est, en effet, très usitée en pareil cas et nous en verrons plusieurs applications. Dans cette turbine, le liquide traverse la jante de part en part. Mais on trouve quelquefois préférable de faire ressortir l'eau par les orifices d'entrée; on obtient ainsi un appareil qui se rapproche, à plus d'un point de vue, de l'ancienne roue Poncelet.

C'est sous cette forme que se présente le petit récepteur représenté par la figure 219, et qui est fort employé pour utiliser l'eau motrice de la canalisation de Genève. Il est construit par la maison Escher, Wyss et Cie, de Zurich. Sur le pourtour d'un disque *AA*, monté sur l'arbre du moteur, sont implantées des aubes courbes *B*, *B*, qui reçoivent l'action de la veine liquide lancée par l'ajutage *C*. Ce qui distingue cet intéressant appareil, c'est le procédé employé pour régler la vitesse, de telle sorte que la dépense d'eau reste proportionnée au travail à produire. L'orifice *C* est compris entre une lèvre fixe *D* et une lèvre mobile *EF* oscillant autour de l'articulation *F*. La section d'écoulement est ainsi variable avec la position de la lèvre *E*. Celle-ci est actionnée par le régulateur centrifuge *G*, à l'aide d'une commande fort ingénieuse. Elle est munie d'une queue *H* sur laquelle agit un piston *J*. Ce piston reçoit directement sur sa face inférieure la pression de l'eau motrice, qui tend à le repousser vers le haut. La même eau motrice s'introduit au-dessus du piston par un petit orifice. Dans cette situation, le piston est en équilibre et obéit à la pression qui s'exerce sur la lèvre *EF* et qui tend à ouvrir l'orifice *C*. Mais supposons qu'on vienne à ouvrir le petit canal *a* : immédiatement la pression s'abaisse au-dessus du piston *J*, lequel s'élève en diminuant la section de l'orifice *C*. Il s'établit une position de régime, qui dépend de la proportion qui existe entre les ouvertures d'admission et d'échappement, au-dessus du piston. Cette proportion est sous la dépendance du régulateur, qui ferme plus ou moins, à l'aide d'un pointeau, le canal d'échappement *a*. Le système est fort ingénieux et très efficace.

Tout l'appareil est enfermé dans une enveloppe en fonte, qui s'oppose aux éclaboussures. La marche est silencieuse et régulière; l'ensemble est de volume très restreint et ne nécessite, pour ainsi dire, aucune fondation. Sous une pression de

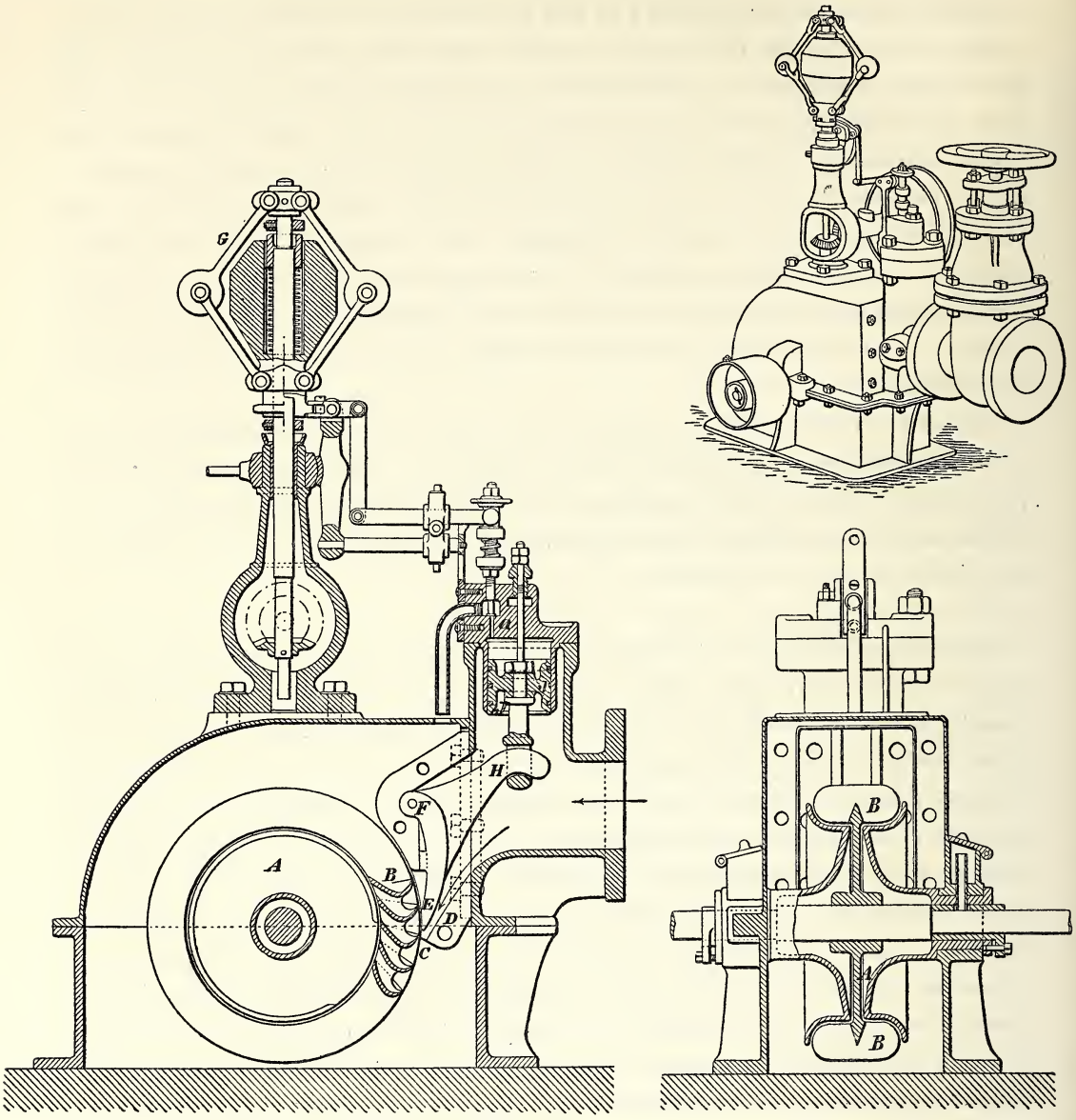


Fig. 219. — Récepteur hydraulique de Escher, Wyss et Cie.

140 mètres d'eau, un pareil moteur, tournant à 1,500 révolutions, développe près de 12 chevaux de puissance.

Nous donnons ci-après (fig. 220) le dessin d'une magnifique turbine exposée par la Société alsacienne de construction mécanique, qui a ses ateliers à Belfort, Mulhouse et Grafenstaden. Cette turbine est faite pour une chute de 30 mètres; sa vitesse de régime est de 150 tours, et sa puissance de 150 chevaux-vapeur. Elle est du système Girard, à injection partielle et à libre déviation. L'introduction de l'eau est faite par

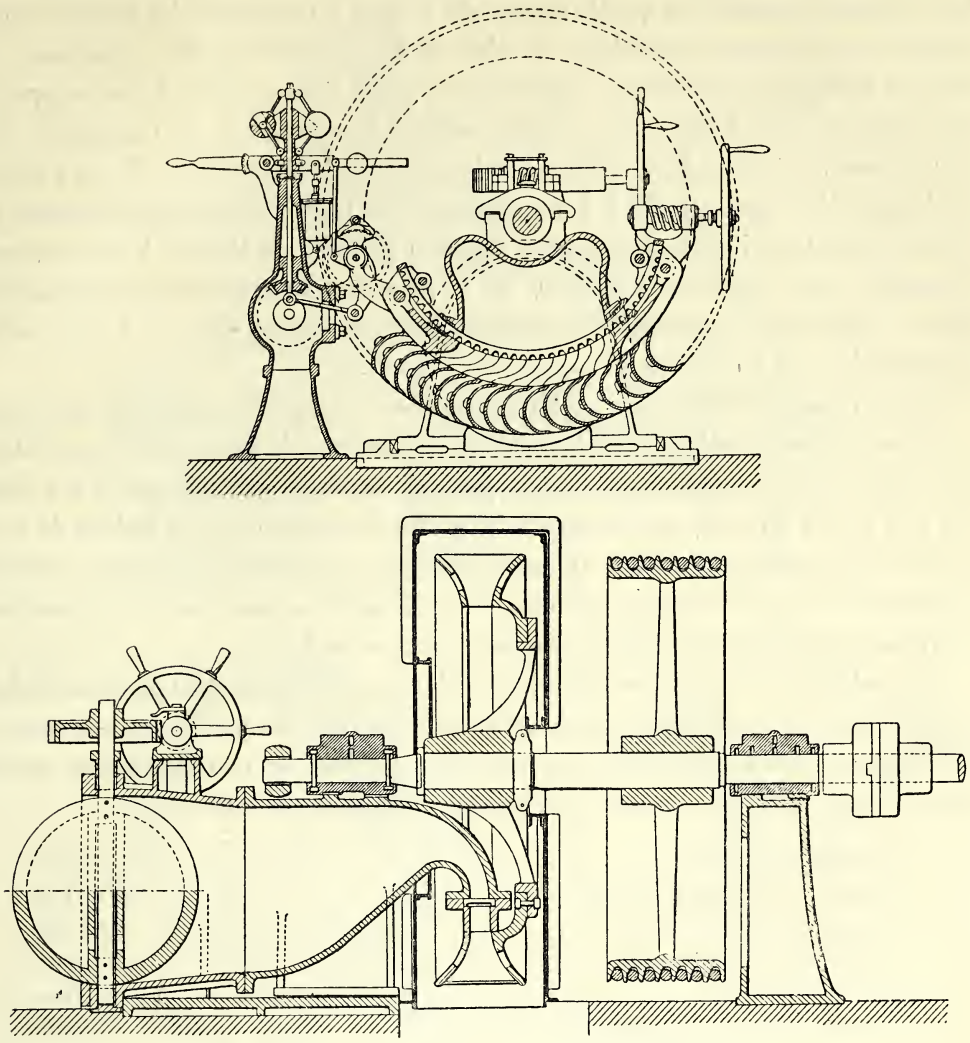


Fig. 220. — Turbine de la Société Alsacienne.

un injecteur occupant un arc d'à peu près 60 degrés et portant douze orifices. Sur ces orifices circulent deux obturateurs glissants, mus par engrenage; l'un est manœuvré à la main, l'autre par un régulateur centrifuge. La transmission entre le régulateur et sa vanne est constituée par une prise de mouvement, faite sur l'arbre de la turbine, et un encliquetage à deux directions. Suivant la position du régulateur, la vanne se déplace dans un sens ou dans l'autre, et modifie en conséquence la section d'écoulement. Une vanne de garde tournante est installée sur la souche de la conduite d'amenée. Cette machine est remarquable, aussi bien par son dessin que par son exécution.

Parmi les ateliers qui se sont fait une spécialité de la construction des moteurs hydrauliques, il convient de citer la maison Joh. Jacob Rieter, de Winterthur (Suisse), qui a acquis, dans l'établissement de ces machines, une ancienne et légitime réputa-

tion. Depuis cinquante ans qu'elle existe, elle a livré à l'industrie des moteurs représentant une puissance hydraulique de plus de 80,000 chevaux. Son exposition, fort riche et habilement présentée, comportait un grand nombre de turbines, adaptées à des chutes et à des débits variés. Comme turbines à axe vertical, on remarquait, dans cette exposition, des modèles établis pour des hauteurs de chute de 2 m. 50 à 12 mètres, et donnant des puissances de 5 à 220 chevaux. Les types à axe horizontal étaient dessinés d'après les principes de la roue à injection partielle de Girard. A côté des petits appareils, pour distribuer à domicile de la puissance empruntée à une canalisation d'eau comprimée, figuraient trois turbines pour des chutes de 100 à 500 mètres, donnant de 20 à 200 chevaux.

C'est la maison Rieter qui a établi les superbes turbines fournissant le mouvement à l'usine de Terni, en Italie. La chute est de 180 mètres; la force motrice, qui s'élève à un total de 3,000 chevaux, est fournie par onze turbines, qui tournent à des vitesses de 180 à 850 tours, et qui développent de 20 à 1,000 chevaux. La turbine de 1,000 chevaux, qui actionne le train universel, dépense par seconde 560 litres. Sa vitesse varie de 180 à 240 tours par minute, et son diamètre est de 2 m. 40; à 240 tours, la vitesse circonférencielle dépasse 30 mètres par seconde.

Les mêmes constructeurs ont établi des turbines pour le percement du Saint-Gothard.

La figure 221 représente une belle turbine de 100 chevaux, destinée à donner le mouvement à des dynamos. Elle travaille sous une chute de 170 mètres avec un débit moyen de 63 litres par seconde. Les principales dimensions sont :

Diamètre extérieur	1^m 390
Diamètre intérieur de la jante	1 160
Largeur des aubes à l'entrée	0 078
Largeur des aubes à la sortie	0 164
Nombre d'aubes	100
Nombre de tours par minute	400

L'appareil d'injection est à orifice unique et à section variable. La lèvre mobile, sensiblement équilibrée sur son axe, est sous l'action directe du régulateur centrifuge.

Ce système n'est plus applicable dans les cas où l'injecteur comporte plusieurs orifices. MM. Rieter en reviennent alors à l'obturateur glissant de Girard. Mais cet organe, moins doux à manœuvrer, ne saurait être commandé par le régulateur. Celui-ci agit sur un embrayage par courroies et à deux directions opposées, qui prend son mouvement sur l'axe de la turbine. La douille du régulateur porte une came qui, suivant la hauteur qu'elle occupe, agit alternativement sur deux galets, dont le déplacement met la courroie en prise avec l'une ou l'autre de deux poulies motrices tournant en sens inverse. Le mouvement ainsi obtenu est transmis par engrenage aux obturateurs.

L'exposition de la maison Rieter dénote une étude approfondie et persévérante de toutes les conditions d'établissement des turbines dans les cas les plus variés. La construction est de premier ordre.

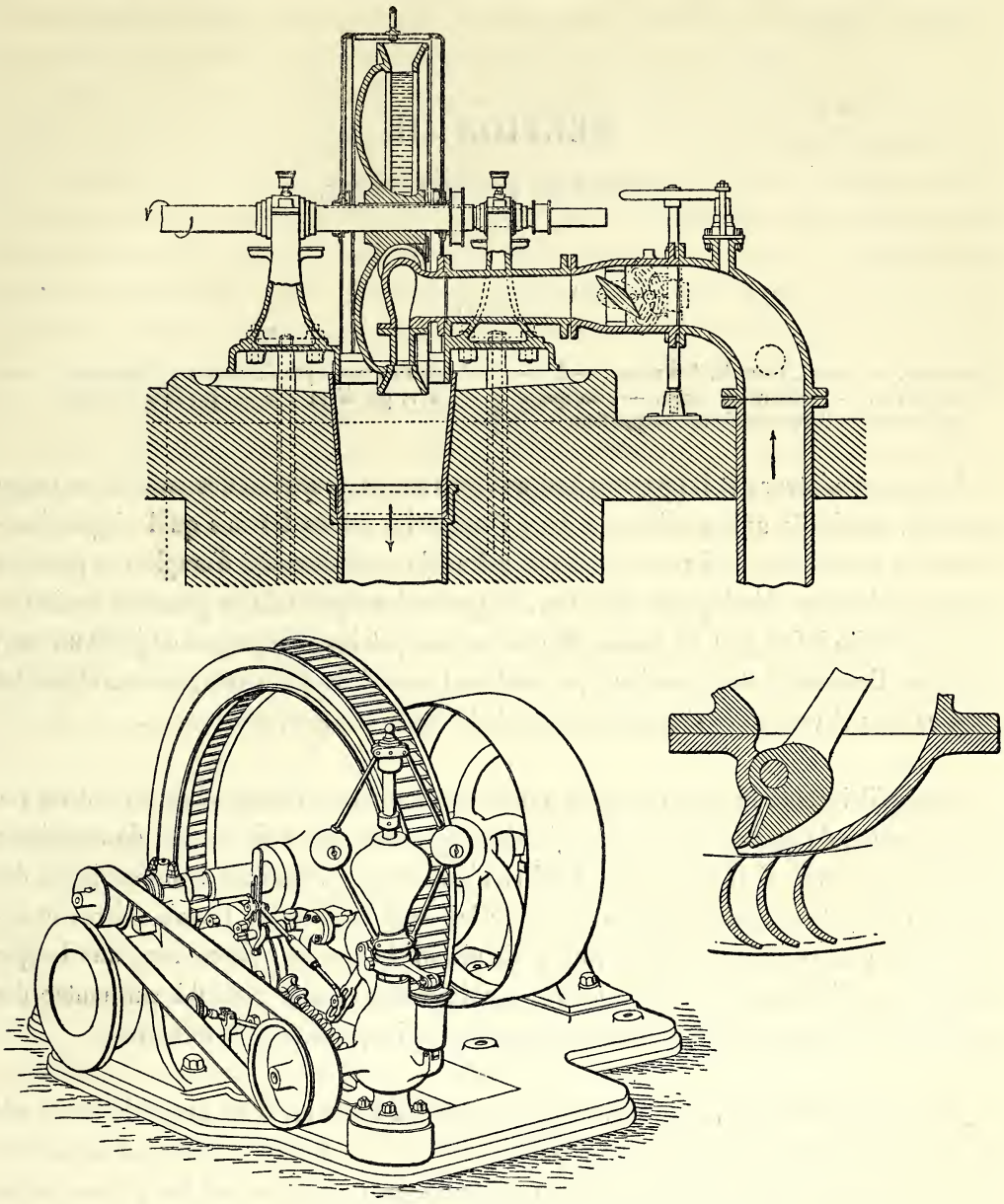


Fig. 221. — Turbine de Rieter.

Mentionnons encore les très jolies petites turbines exposées par la Société anonyme Électricité et Hydraulique, de Charleroi (Belgique); elles ont été étudiées par M. Julien Dulait. Elles se branchent sur la conduite d'une distribution d'eau, et servent à actionner des outils tournant à grande vitesse, dynamos, ventilateurs, etc. Le moteur et l'outil forment un ensemble fort peu volumineux, qui peut être logé n'importe où et gouverné à distance par un simple robinet. On conçoit quelles commodités présente un tel système dans un grand nombre de circonstances variées.

SECTION III.

PRESSES ET ACCUMULATEURS.

SOMMAIRE.

Généralités. — Pascal, Bramah, Armstrong. — L'accumulateur. — Pressions en usage. — Principales applications. — Caractères de cette exposition.

Appareils exposés par l'*Hydraulic Engineering Company*, par *Morane jeune*, par *Morane aîné.*

Les accumulateurs et les presses hydrauliques sont aujourd'hui des outils d'un usage courant, employés universellement dans l'industrie, toutes les fois qu'il s'agit d'exécuter des manœuvres de force. Par le fait même de cette diversité d'emplois et pour les raisons qui seront développées plus bas, la partie descriptive de la présente section se trouve réduite à fort peu de chose. Mais il ne sera pas hors de propos de jeter un coup d'œil sur l'ensemble des questions que soulève l'emploi de l'eau comprimée, et sur les applications si variées et si nombreuses qu'elle reçoit chaque jour.

Lorsqu'il inventa le principe de la presse hydraulique, Pascal avait surtout en vue la production de grands efforts. Il s'agissait simplement, dans sa pensée, de remplacer le levier ou la vis. Il imagina, à cet effet, d'utiliser les propriétés hydrostatiques des liquides pour transformer l'un dans l'autre les deux facteurs du travail : force et espace. Par l'intermédiaire de l'eau, un petit piston de pompe, parcourant une longue course sous l'action d'un effort modéré, obligeait un large piston à surmonter des résistances énormes, mais en ne se déplaçant que de quantités très minimes.

Par des perfectionnements bien compris, Bramah fit entrer dans la pratique cet admirable instrument, et l'usage s'en répandit dans un assez grand nombre d'industries. La presse hydraulique offre, en effet, des avantages nombreux sur les presses ordinaires, dans lesquelles la transmission est purement cinématique. Le nouvel outil avait des organes d'une grande simplicité et susceptibles d'une grande résistance. En outre, il possédait un rendement fort élevé, contrairement aux presses mécaniques, dans lesquelles les frottements absorbent la plus grande partie du travail. Néanmoins, pendant longtemps, les applications demeurèrent assez restreintes et limitées à des cas spéciaux.

Mais il y a près d'un demi-siècle, entre les mains d'un ingénieur éminent, sir William Armstrong, la question changea complètement de face. Adaptant, avec une sagacité merveilleuse, aux besoins de l'industrie les propriétés physiques des liquides,

Armstrong sut créer, sur le principe de la presse de Pascal, un outillage complet et pratique, qui en peu d'années fut adopté dans tous les pays civilisés.

L'eau est incompressible; à des vitesses modérées, elle s'écoule sans frottement notable; ce sont là les deux propriétés qui servent de base à la presse hydraulique. Lorsque, au contraire, l'eau s'écoule à grande vitesse, la puissance vive ainsi développée absorbe une quantité très grande de travail. Un orifice étroit ne laisse passer des volumes d'eau un peu importants qu'à la condition qu'entre ses deux faces il règne une différence de pression considérable. Il en résulte que l'eau constitue un frein d'une puissance presque illimitée et d'une délicatesse parfaite. Ainsi, à l'aide de l'eau comprimée, on peut, non seulement soulever des charges énormes, mais encore les déposer au point voulu, aussi lentement qu'il est besoin et avec une précision pour ainsi dire absolue.

Armstrong traita la question avec une grande largeur. Ce n'est pas seulement à petite distance qu'il songea à transmettre la pression; il établit des canalisations développées, de plusieurs kilomètres de longueur, parcourues par l'eau comprimée et desservant un grand nombre de récepteurs dispersés sur de vastes surfaces.

Une installation de cette nature se compose de trois éléments principaux : une usine centrale, dans laquelle est fabriquée l'eau comprimée, une canalisation et les outils opérateurs; mais elle comporte, en outre, divers organismes, qui assurent la régularité du fonctionnement.

Parmi ces organismes, l'un des plus caractéristiques, c'est l'*accumulateur*. Les machines réceptrices, avons-nous dit, sont éloignées de l'usine centrale; chacune d'elles a à sa disposition la puissance motrice, qu'elle puise, suivant les besoins, dans la canalisation. La consommation et la production de l'eau comprimée étant ainsi indépendantes l'une de l'autre, il est nécessaire d'intercaler un réservoir, qui emmagasine les excédents de production et les restitue lorsque la consommation devient prépondérante. Tel est le rôle de l'accumulateur, véritable magasin d'eau comprimée. Il se compose d'un piston de grande dimension, comme course et comme diamètre, qui est chargé d'un poids très lourd, et soulevé par la pression de l'eau refoulée par l'usine centrale. Il s'élève dans son cylindre, lorsque la production l'emporte sur la consommation; il s'abaisse dans le cas contraire, mais il assure dans la canalisation une pression de régime à peu près constante. L'accumulateur est d'ailleurs pourvu de moyens de réglage, combinés de telle sorte, que sa contenance ne soit jamais dépassée. Lorsque le piston approche de sa levée maximum, il agit sur les machines de l'usine centrale, il modère leur allure ou bien ouvre une décharge partielle à l'eau qu'elles débitent.

Par l'invention de l'accumulateur, Armstrong a donné au principe de la presse hydraulique une extension pour ainsi dire indéfinie, et ouvert aux applications industrielles de ce principe un champ presque illimité.

Lorsqu'on se sert d'un liquide pour transmettre le travail, le calcul démontre et

l'expérience confirme qu'il est avantageux de recourir à des pressions élevées. Car, à égalité de puissance, tous les organes, pistons, cylindres, deviennent plus petits, plus légers, plus maniables, moins coûteux. Dans les applications simples, ne comportant qu'un outillage restreint et une tuyauterie de faible dimension, on se sert le plus souvent de hautes pressions, allant à 500, 800, dans quelques cas même jusqu'à 1,000 atmosphères et au delà. Mais lorsqu'il s'agit d'outils nombreux et d'une canalisation longue et compliquée, il en est autrement. La question des joints et des fuites, qui croissent avec une rapidité extrême en même temps que la pression, prend ici une importance prépondérante. Dans de pareilles circonstances, on se contente ordinairement de pressions modérées, de 50 à 100 atmosphères.

Parmi les emplois, extrêmement nombreux, qu'a reçus la transmission du travail à l'aide de l'eau comprimée, il convient de citer en première ligne les appareils de levage, sous les formes et dispositions les plus diverses. C'est d'ailleurs dans les ports de mer, pour le chargement et le déchargement des navires, que le système a reçu ses premières et plus importantes applications. On s'en sert pour actionner des grues, fixes ou roulantes; une simple manœuvre de robinet suffit pour élever la charge, l'affaler ou orienter la grue. Les grandes bigues destinées à mettre à bord les énormes pièces de canon, les plaques de blindage, les machines et les chaudières, sont mises en mouvement par l'eau sous pression et se manœuvrent avec une facilité et une précision parfaites. Il en est de même des culbuteurs, à l'aide desquels on décharge, d'un seul coup, un wagon entier dans la cale d'un navire. Il faut aussi mentionner les appareils de carénage, qui permettent de soulever verticalement et de mettre à sec les navires du plus gros tonnage. Les grands navires de guerre sont pourvus d'une distribution d'eau comprimée pour le service des bouches à feu et des projectiles. C'est aussi dans les ports de mer qu'on voit ces immenses ponts mobiles, pesant des centaines de tonnes, et qu'un ouvrier, assis devant sa table de distribution, fait mouvoir rapidement, en silence et sans exercer aucun effort.

Dans les usines métallurgiques, où l'on a à manipuler fréquemment des poids très lourds, l'eau sous pression rend des services inappréciables. C'est ainsi, par exemple, que pour la fabrication de l'acier, les énormes convertisseurs, remplis de métal en fusion, s'inclinent, se redressent, se renversent; que les poches, qui contiennent plusieurs tonnes d'acier, se soulèvent et versent leur contenu dans des creusets. Toutes ces manœuvres sont faites lestement et sans bruit, et c'est un merveilleux spectacle que ces immenses ateliers, où quelques rares ouvriers suffisent à tous les besoins de ces opérations actives, qui roulent sur des centaines de tonnes de production journalière.

Les métallurgistes se servent également de l'eau comprimée pour actionner les outils les plus divers. Il suffira de citer ces presses à forger qui font, tranquillement et silencieusement, la même besogne que les marteaux-pilons les plus puissants.

C'est par l'eau comprimée que les mécaniciens actionnent leurs cisailles, leurs poinçonneuses et ces admirables riveuses, qui font un travail dont les marteaux les plus vigoureux et les plus habiles ne sauraient atteindre la perfection.

Les chemins de fer utilisent l'eau comprimée sous les formes les plus diverses. Dans leurs ateliers, ils s'en servent pour les grues et autres appareils de levage, pour le montage des roues des wagons et des locomotives; sur la voie, pour la manœuvre des wagons, plaques tournantes, chariots roulants, etc.

Les Parisiens ont sous les yeux de belles applications de ce système, entre autres à la gare de la Chapelle pour les wagons de marchandises, et à la gare Saint-Lazare pour des services très multiples.

Dans les hôtels, dans les grands magasins, dans les établissements publics, dans les maisons particulières, les ascenseurs sont presque tous mis en mouvement par l'eau sous pression. Sans sortir de l'enceinte de l'Exposition, on admirait des spécimens grandioses de ces sortes d'appareils.

L'énumération est loin d'être complète. Elle suffit néanmoins pour donner une idée des services importants que rend, dans les circonstances les plus variées, le système imaginé par Armstrong. On remarquera d'ailleurs que, dans chacune des applications, la destination de l'appareil est, pour ainsi dire, spécialisée. Une machine à vapeur d'un type courant peut être indifféremment appliquée aux usages les plus divers, et, le plus souvent, le constructeur qui l'établit ignore quel en sera l'emploi. Ici, il n'en est plus de même; qu'il s'agisse d'une presse, d'une grue ou d'un ascenseur, l'outil fait corps avec le récepteur et n'en peut être séparé.

De cette spécialisation extrême résultent quelques conséquences singulières, au point de vue du classement des produits exposés. En premier lieu, parmi les appareils en question, tous ceux qui sont affectés à une industrie qui n'est pas exclusivement mécanique ont été attribués à la classe qui représente cette industrie; par suite, ils échappent à la classe de la mécanique générale. Mais ceux de ces appareils dont l'application est essentiellement mécanique, et qui, par conséquent, sont du domaine de la classe 52, ne sauraient, pour la plupart, être décrits à côté des appareils hydrauliques. C'est ainsi que les grues, les ascenseurs, etc., qui sont essentiellement des appareils de levage, trouveront, dans le présent rapport, leur place toute naturelle au chapitre qui traite des machines qui servent à la manœuvre des fardeaux.

La conséquence de ce qui précède, c'est que la partie descriptive de la présente section se trouve réduite à fort peu de chose, malgré les applications nombreuses et magnifiques que l'on rencontrait, à l'Exposition, de machines actionnées par l'eau sous forte pression.

L'Hydraulic Engineering C°, de Chester (Angleterre), a établi à Londres une distribution de travail à l'aide de l'eau comprimée. La canalisation a une étendue de plus de

60 kilomètres et dessert un grand nombre d'industries. Les machines actionnées par la pression de l'eau sont très variées comme dispositions et comme puissance.

La compagnie expose quelques modèles fort bien conçus et habilement présentés. On remarque, entre autres : les modèles des pompes à vapeur verticales, qui servent à refouler l'eau dans la canalisation; ceux des ascenseurs, dont la cabine est équilibrée par un accumulateur; des récepteurs du système Brotherhood, pour donner le mouvement à des outils divers; une riveuse hydraulique; un multiplicateur de pression, appareil qui a pour objet de produire, au moyen de la pression empruntée à une canalisation, une pression plus ou moins forte, dans une proportion que l'on peut graduer à volonté.

M. F. Morane jeune, de Paris, a construit les pompes et l'accumulateur destinés au service de l'ascenseur Edoux, établi dans la galerie des Machines, et sur lequel nous aurons à revenir. Il présentait en outre, dans son exposition particulière, plusieurs belles machines, aussi remarquables par leur exécution que par leur conception.

Signalons une pompe de compression, qui offrait cette particularité, que les deux pistons, solidaires des boîtes à clapet, étaient fixes, le cylindre étant actionné par la transmission. Puis un très beau buffet de pompes, donnant une pression de 600 atmosphères, avec débrayage automatique, pour empêcher la pression de dépasser cette limite. La même exposition comportait, en outre, plusieurs presses, destinées à des industries spéciales.

M. P. Morane aîné, de Paris, expose un ensemble d'appareils ayant pour objet la production de l'eau sous pression pour le service de presses à comprimer. Un buffet de douze pompes est actionné par une machine à vapeur. Les dix premières pompes délivrent l'eau à une pression de 50 kilogrammes par centimètre carré à un accumulateur. Celui-ci peut, au moyen d'un distributeur, être mis en relation, soit avec les presses à actionner, soit avec un multiplicateur de pression. Ce dernier appareil est constitué par deux pistons, montés sur une même tige, et dont les aires sont dans le rapport de 1 à 6. En faisant agir sur le grand piston la pression de 50 kilogrammes, on obtient, sur le petit piston, une pression six fois plus grande, c'est-à-dire de 300 kilogrammes par centimètre carré.

Lorsque l'appareil est en service, les deux dernières pompes du buffet envoient leur eau, sous une pression de 300 kilogrammes, dans le petit cylindre du multiplicateur, dont le grand cylindre reste en relation avec l'accumulateur. Les pressées se font en deux temps. On commence par fournir aux presses de l'eau à 50 kilogrammes; puis, lorsqu'elles sont à refus sous cette pression, on complète l'opération en admettant de l'eau à 300 kilogrammes prise au multiplicateur. Celui-ci, sous l'action de l'accumulateur principal, fonctionne comme un accumulateur secondaire à l'égard des deux pompes à haute pression.

Les dimensions principales sont :

POMPES.

Diamètre des pistons	25 millim.
Course	60 —
Nombre de tours par minute	49

ACCUMULATEUR.

Diamètre du piston	180 millim.
Course	2,000 —
Capacité	50 litres.
Charge	12,720 kilogr.

MULTIPLICATEUR.

Diamètre	du grand piston	276 millim.
	du petit piston	113 —
Course commune		700 —
Capacité du petit cylindre		7 litres.

Des dispositions spéciales sont prises pour empêcher les pistons de dépasser les limites de leurs excursions. L'appareil est bien compris et bien exécuté.

SECTION IV.

APPAREILS DIVERS.

SOMMAIRE.

Compteurs d'eau. — Généralités.

Compteurs sans pression de Casalonga, de Bonijoly et de Prandières (Compagnie des Forges de l'Horme).

Compteurs sous pression. — Conditions à remplir. — Compteurs à turbine de Berhaut. — Compteurs à piston de Schmid (d'Espine, Achard), de Samain, de Frager (Bariquand, Michel), de Thomson, de la Watermeter C°.

Régulateur de Bourdilliat (Leprince).

Vanne cylindrique de Decoeur.

Pnéole de de Romilly.

Appareils de Parenty.

Nous étudierons dans la présente section :

1° Les machines ayant pour objet le mesurage des liquides;

2° Divers appareils hydrauliques, originaux ou intéressants, qui ne se rapportent à aucune des sections précédentes.

Depuis la dernière Exposition, la question des compteurs d'eau a fait un pas important; en 1878, il existait quelques compteurs, mais l'usage ne s'en était guère répandu; il en est tout autrement aujourd'hui; les compteurs d'eau s'emploient d'une manière habituelle et courante, presque au même titre que les compteurs à gaz.

La pratique des compteurs a suivi, étape par étape, le développement des canalisations d'eau. Lorsque, dans une ville dépourvue jusqu'alors d'alimentation d'eau, on vient à établir une distribution, le volume d'eau mis à la disposition du public est, en général, bien supérieur aux besoins actuels; les habitudes prises ne se laissent pas bouleverser du jour au lendemain; la consommation reste restreinte, elle s'accroît lentement, et il faut souvent fort longtemps pour qu'elle atteigne son niveau normal.

Pendant les premières années, il n'y a pas un grand intérêt à contrôler exactement la consommation, et même un certain laisser-aller peut-il avoir pour effet d'accélérer la transformation des habitudes. C'est l'époque des mesurages grossièrement approximatifs; l'instrument ordinaire est le *robinet libre;* l'acheteur d'eau a à sa disposition un robinet branché directement sur la conduite; il l'ouvre et puise de l'eau quand et comme il veut; le vendeur d'eau fait fond sur la probité publique et espère que le client fermera le robinet, dès qu'il aura puisé la quantité d'eau dont il a sérieusement besoin.

Pour les consommations d'eau plus importantes, on a recours au *robinet de jauge :* l'écoulement se produit d'une manière continue sous la pression qui règne dans la conduite, par un orifice étroit, qui déverse ses eaux dans un réservoir installé dans

l'immeuble à desservir. C'est dans ce réservoir que le consommateur vient puiser au moment du besoin. La redevance payée par l'abonné est tarifée d'après la section de l'orifice d'écoulement, ce qui suppose que la pression dans la conduite est à peu près constante et l'orifice rigoureusement calibré.

Inutile d'insister sur les abus qu'entraînent forcément de pareils systèmes, non plus que sur le gaspillage qui en est la conséquence inévitable.

Cependant, la consommation d'eau s'est développée; il arrive un moment où la canalisation primitivement établie menace de devenir insuffisante pour subvenir à toutes les demandes. Avant d'entreprendre de nouveaux travaux d'amenée et de distribution, travaux importants et qui absorbent des capitaux énormes, le vendeur d'eau cherche à se rendre compte de l'emploi qui est fait de la marchandise qu'il délivre et de la manière dont elle est mesurée et payée. C'est alors qu'intervient le compteur.

Le *processus* que nous venons de résumer n'est pas une simple hypothèse; c'est exactement ainsi que les choses se sont passées dans un grand nombre de villes. Et de plus, fait assurément remarquable, mais qui n'a rien de bien surprenant, la marche a été à peu près parallèle dans les différents pays. Ce n'est guère que depuis une dizaine d'années que le besoin s'est fait sentir de posséder de bons compteurs d'eau, et ce besoin est devenu général.

D'ailleurs, des difficultés parfois fort sérieuses se sont élevées lorsqu'il s'est agi d'imposer à la clientèle l'usage de ces instruments. Il fallait modifier les polices d'abonnement; on avait à compter avec de nouvelles et importantes dépenses, à lutter contre des habitudes acquises, parmi lesquelles l'habitude de l'abus est la plus difficile à déraciner, celle qui se défend avec la plus ardente ténacité.

Les choses une fois mises en ordre, ou à peu près, on a constaté dans bien des cas que les abus en question atteignaient des proportions dont on n'avait pas d'idée. C'est l'effet ordinaire qui se produit, lorsqu'on vient à mesurer exactement des quantités qu'on s'était borné jusqu'alors à évaluer grossièrement. D'ailleurs, lesdits abus se répartissaient fort inégalement; certains clients étaient scandaleusement favorisés, non seulement aux dépens du vendeur, mais aussi aux dépens des autres consommateurs. A la suite de ces vérifications, il se trouva que des canalisations, considérées comme insuffisantes, étaient en état de subvenir largement à tous les besoins, aussi bien pour le présent que pour un avenir assez éloigné. Enfin, l'usage des compteurs permit de constater des fuites importantes, d'en retrouver les emplacements et de les aveugler.

Dans un grand nombre de villes, les compteurs d'eau sont entrés largement dans les habitudes; on a installé des ateliers et services publics pour les recevoir, les vérifier et en contrôler le fonctionnement. Le mesurage a remplacé l'évaluation arbitraire, c'est un progrès considérable. Toutefois, on ne saurait dire que la question soit entièrement résolue; car, même pour le genre de mesures dont il s'agit, la plupart des compteurs en usage sont sujets à des incertitudes et à des erreurs qu'il serait fort utile de restreindre.

Un bon compteur de liquide est, en effet, un instrument difficile à établir, à cause des conditions multiples auxquelles il doit satisfaire. Ces difficultés, très grandes lorsqu'il s'agit du service habituel qu'ont à faire les compteurs, se trouvent considérablement réduites, dans les cas où le liquide à mesurer s'écoule par un orifice à l'air libre et sans pression. C'est par l'étude de ce cas simple que nous allons commencer.

Le compteur d'eau exposé par M. Casalonga, de Paris, est fort simple de construction; c'est une roue à tympan, qui reçoit le liquide près de son axe et le déverse à sa circonférence. Le mouvement de cette roue est transmis, par engrenages, aux aiguilles d'un compteur de tours.

La Compagnie des Forges de l'Horme (Loire) construit dans ses chantiers de la Buire un compteur alcoométrique, imaginé par MM. Bonijoly et de Prandières. Les auteurs ont défini très nettement les conditions du problème à résoudre : il s'agit de réprimer les fraudes énormes qui s'exercent dans la fabrication des alcools, fraudes suscitées par les droits élevés qui pèsent sur ces produits. En dépit de leur zèle et de leur compétence, les agents du fisc, une véritable armée, ne parviennent pas à empêcher la fraude, à cause de la complexité et du nombre des opérations qu'ils ont à exécuter. Les inventeurs ont eu l'idée de recourir à un mesurage automatique, donnant à la fois le volume et la richesse de l'alcool fourni par les appareils distillatoires.

Comme organes mécaniques, le compteur est fort simple; c'est une sorte de roue à tympan, qui reçoit le liquide par son centre, le déverse par sa circonférence, et dont les mouvements sont enregistrés sur un cadran. Pour fournir le degré alcoolique, la roue est munie d'une sorte de petite cuiller, qui, à chaque tour, prélève un échantillon, c'est-à-dire une fraction déterminée du volume total écoulé. Ces échantillons successifs sont déversés dans un réservoir spécial; c'est dans ce réservoir, dont le contenu dans son ensemble représente bien la moyenne des produits fabriqués, que l'on vient chaque jour mesurer le titre à l'aide des méthodes alcoométriques ordinaires. La prise du titre et la lecture du compteur permettent immédiatement d'établir la quantité d'alcool réel fabriqué, quantité qui sert de base à l'établissement de la taxe.

Passons à l'étude des compteurs sous pression. Ici le problème devient beaucoup plus délicat. Pour répondre complètement aux conditions les plus habituelles qui se posent dans les distributions, il faudrait que l'instrument possédât des qualités nombreuses, parmi lesquelles il convient de noter les suivantes :

Il devrait, en premier lieu, donner le compte exact des volumes de liquide qui le traversent, et cela quelles que soient les circonstances dans lesquelles il est appelé à fonctionner. Or ces circonstances sont fort variables : dans les conduites urbaines, la pression s'élève et s'abaisse rapidement, et parfois dans des limites étendues; d'autre part, le compteur doit mesurer, non seulement les débits importants, mais encore, et c'est

là une des plus grandes difficultés, les écoulements les plus minimes. Il ne doit pas donner lieu à des pertes de charge sensibles. Il faut qu'il résiste sans détériorations aux pressions élevées et même aux coups de bélier. Ses organes ne doivent être entamés ni par l'usure, ni par l'oxydation, ni par les matières en suspension charriées par le liquide. L'appareil doit fonctionner régulièrement, presque sans entretien ni graissage. Si l'on ajoute à toutes ces conditions le bas prix d'achat, on se fera une idée des difficultés à surmonter pour résoudre le problème.

Aussi n'est-il pas résolu encore, au moins d'une manière complète. Toutefois, il existe un certain nombre de solutions qui sont acceptables dans l'état actuel des choses. Mais c'est avec raison que les administrations, soucieuses des intérêts importants qu'elles ont entre les mains, se montrent rigoureuses pour l'admission des nombreux compteurs qui leur sont proposés. Cette sévérité est fort utile pour provoquer de nouveaux efforts et de nouvelles recherches.

Pour les jaugeages approximatifs, on se contente quelquefois de compteurs à turbine. Tel est celui exposé par M. Berhaut, de Liège.

Qu'on se figure une sorte de sirène, dont la roue mobile, percée d'orifices obliques, est actionnée par le liquide en mouvement, lequel est lancé par des orifices distributeurs. La rotation de la turbine est transmise aux aiguilles d'un compteur de tours. Des détails de construction bien entendus donnent à cet appareil une certaine valeur.

Les véritables compteurs sont du système dit *à piston*. Comme dispositions générales, ils ne sont autre chose que des machines à colonne d'eau, avec cette différence importante qu'il n'y a pas de résistance extérieure. Il en résulte que la perte de pression entre l'admission et l'échappement est réduite à ce qui est strictement nécessaire pour surmonter les frottements, qu'on s'efforce d'ailleurs de rendre aussi minimes que possible. En voici quelques exemples :

MM. d'Espine, Achard et Cie, de Paris, construisent un compteur étudié par un ingénieur suisse bien connu, M. Schmid (fig. 222).

Deux pistons longs, sans garniture et à double effet, attaquent par bielles deux manivelles rectangulaires, montées sur un arbre commun. Comme dans les appareils de cette nature la distribution est nécessairement sans détente ni avances, on a pu utiliser chacun des pistons comme un tiroir, pour distribuer dans le cylindre voisin. A cet effet, les pistons, ainsi que les cylindres, sont percés de lumières, et une canalisation intérieure, fort ingénieusement combinée, assure en temps voulu l'ouverture et la fermeture des orifices. Les mouvements de l'arbre à manivelles sont traduits par un compteur de tours. Malgré son apparente complication, cet appareil est simple comme service; il est facile à démonter et à régler. Le frottement des organes entraîne nécessairement un graissage régulier; ce serait là une sujétion inadmissible pour les usages

IMPRIMERIE NATIONALE.

domestiques; aussi l'appareil en question est-il spécialement affecté au service des générateurs de vapeur, où il est placé constamment sous la surveillance du chauffeur.

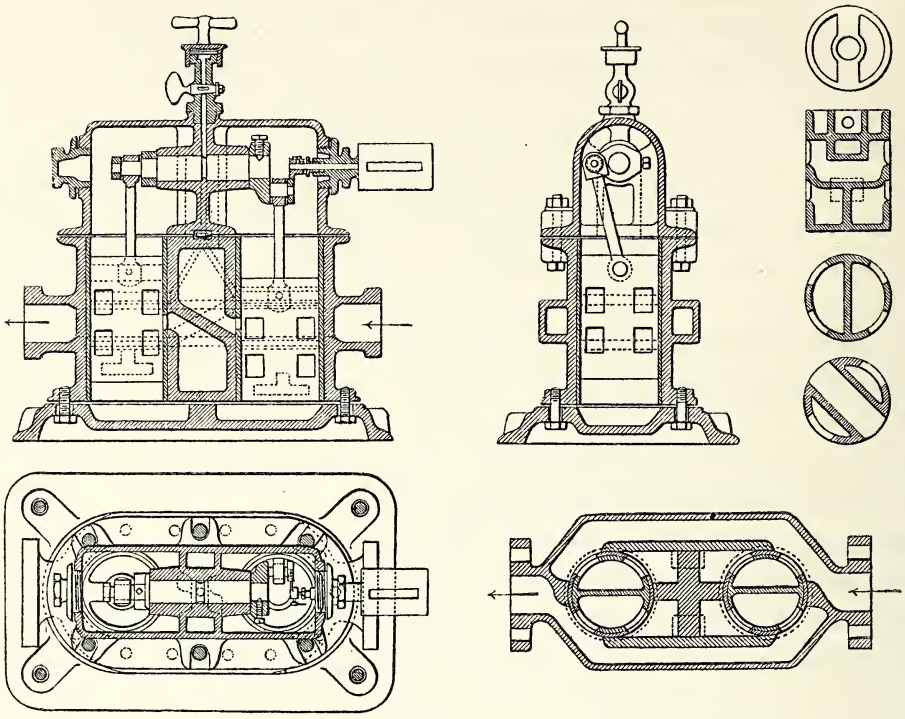


Fig. 222. — Compteur Schmid.

Pour cet emploi particulier, il a fait ses preuves et compte de nombreuses applications dans l'industrie.

M. Schmid a étudié récemment un compteur pour les distributions d'eau; dans ce nouveau modèle, l'arbre tournant est supprimé; l'appareil ne comporte que deux pistons oscillants. Il est trop nouveau pour s'être beaucoup répandu.

M. Samain, de Paris, a étudié deux systèmes de compteurs.

Le premier système, construit par M. Badois, de Paris, se compose de quatre cylindres convergents, parcourus par des pistons à simple effet, qui actionnent, à l'aide de bielles, la manivelle unique d'un arbre tournant. Sur cet arbre est monté le distributeur rotatif, qui met successivement chaque piston en relation avec l'admission et avec l'échappement.

Le second appareil répond mieux aux exigences du problème (fig. 223); il est construit par la maison Samain et Cie. Deux cylindres, en prolongement l'un de l'autre, sont parcourus par des pistons à double effet. Chaque piston, en approchant du fond de sa course, vient en contact avec un levier, qui déplace le tiroir de distribution du cylindre opposé; puis il achève son excursion et s'arrête à bout de course, pour ne re-

prendre son excursion rétrograde que lorsque l'autre piston approchera de l'extrémité de la sienne. Cette disposition, comme on le voit, repose sur le même principe que celle des pompes Worthington, précédemment décrites; elle offre ici de précieux avan-

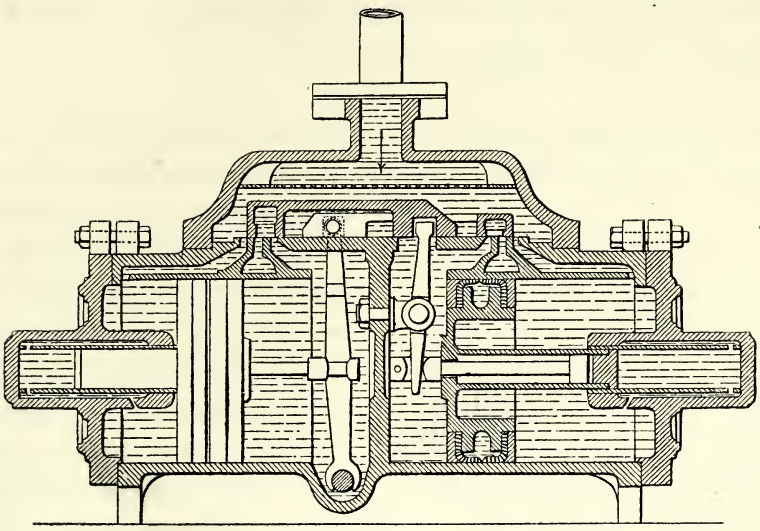


Fig. 223. — Compteur Samain.

tages : simplicité d'organes, atténuation des frottements, course exactement limitée, groupement compact. L'étanchéité des pistons est assurée par des cuirs emboutis. Les indications sont transmises au dehors par le levier de l'un des tiroirs, agissant par une transmission simple, sur un compteur à déclic.

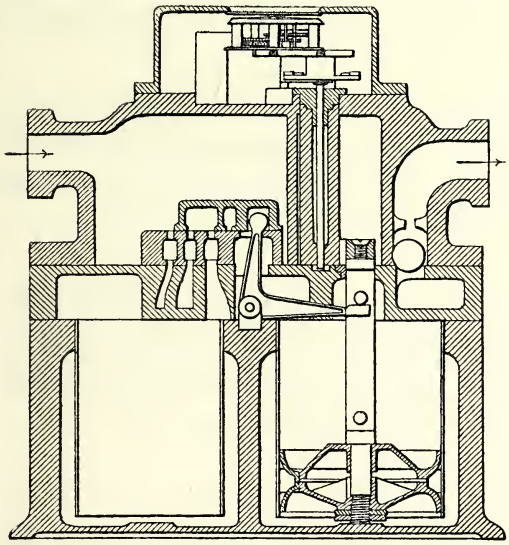


Fig. 224. — Compteur Frager.

Les compteurs du système Frager sont fort répandus et très appréciés. Ils comportent, comme les appareils que nous venons de décrire, deux pistons à double effet, avec distribution à repos, chacun des pistons commandant la distribution de l'autre piston. La figure 224 ci-contre rend compte suffisamment des dispositions et du mode de fonctionnement de ces compteurs.

Ils sont fabriqués, à Paris, par MM. Bariquand et fils et par la Compagnie pour la fabrication des compteurs et matériel d'usines à gaz, ancienne maison Michel et Cie.

C. F. E

Citons encore quelques compteurs intéressants, présentés dans les expositions étrangères.

Le compteur Thomson (John), de New-York, est assez répandu en Amérique. Le volume variable, qui sert de capacité mesurante, est limité d'un côté, par une calotte sphérique et de l'autre par une cloison formée d'un disque qui tourne d'un mouvement conique. Le système est ingénieux et original.

Dans le compteur exposé par la London water meter Company (fig. 225), la partie mobile est une sorte de moulinet, monté sur un arbre. Ce moulinet comporte quatre ailettes planes, qui elles-mêmes sont fixées à l'arbre central à l'aide de pivots, de telle sorte que chaque ailette puisse osciller autour d'un axe passant par son milieu et normal à l'arbre principal. Des guidages convenables assurent la régularité des oscillations; ces guidages, fixés aux deux fonds de la boîte qui contient l'appareil, forment joint sur les bords des ailettes. L'ensemble constitue une sorte de petite machine rotative. La construction est d'ailleurs fort soignée; les moulinets sont en ébonite ou en bronze.

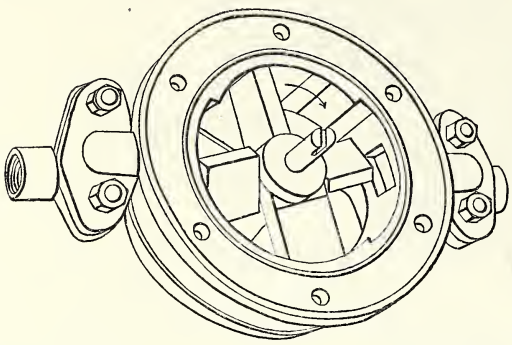


Fig. 225. — Compteur de la London water meter C°.

L'Exposition comportait un certain nombre d'autres systèmes de compteurs, se rapprochant plus ou moins de ceux que nous venons de décrire. Il serait superflu de prolonger outre mesure ces descriptions.

Comme conclusion, nous ne pouvons que répéter ce que nous disions plus haut : le problème est des plus difficiles; il n'a pas encore reçu de solution tout à fait complète et générale; néanmoins, on peut constater que de sérieux progrès ont été réalisés dans ces dernières années.

A côté des appareils que nous avons décrits ci-dessus, on rencontrait, dans les galeries de l'Exposition, certaines machines hydrauliques intéressantes par leur originalité; elles sont, pour la plupart, d'invention récente et, par cela même, elles se prêtent difficilement à une classification. Nous allons en décrire quelques-unes.

M. A. Leprince, de Paris, dont nous avons eu l'occasion de décrire les turbines, applique à ces moteurs un mode de régulation particulier, imaginé par M. Bourdilliat. On sait combien est difficile et incertaine l'application aux turbines du régulateur centrifuge, lequel réussit si complètement pour les appareils à vapeur. C'est que les organes destinés à faire varier la puissance d'une turbine sont lourds et lents à ma-

nœuvrer; lors d'un changement dans la résistance que surmonte le moteur, le régulateur n'arrive pas assez vite à réprimer les écarts de vitesse.

Pour éviter cet inconvénient, M. Bourdilliat emploie un procédé ingénieux : un frein absorbe les excès momentanés du travail moteur, lorsque la turbine tend à s'emballer. La turbine actionne par courroie l'appareil régulateur (fig. 226), lequel comporte une pompe rotative et un pendule conique. Le circuit de la pompe est fermé sur lui-même, de sorte qu'en service normal cette pompe tourne sans absorber de travail. Mais si la vitesse s'accroît, les boules du pendule s'élèvent et entraînent un obturateur équilibré, lequel étrangle en un point le circuit de la pompe; la perte de charge ainsi produite se traduit par une résistance sur l'axe de la machine; c'est un frein hydraulique. D'autre part, l'élévation des boules du régulateur met en prise, par un enclenchement, l'engrenage qui actionne les distributeurs de la turbine, et ramène progressivement ces distributeurs à la position qui correspond à la nouvelle valeur du travail résistant.

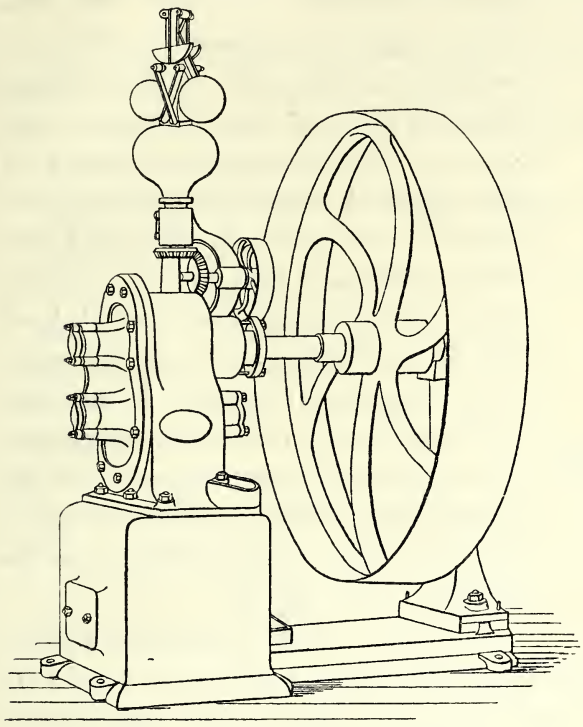


Fig. 226. — Régulateur Bourdilliat.

L'appareil, comme on voit, remplit deux fonctions : en premier lieu, il réprime les accélérations dangereuses; en second lieu, il ramène les organes à leur position de service. Cette double fonction se retrouve également, et sous une forme analogue, dans un appareil de régulation précédemment décrit, le compensateur de M. Denis.

M. Decoeur, de Paris, présente divers appareils fort ingénieusement conçus. La vanne (fig. 227) qu'il a imaginée permet d'établir ou d'interrompre à volonté, rapidement et sans aucun effort, une large communication entre deux biefs placés à des altitudes différentes. Le principe du système est celui de la soupape cylindrique, combinée avec un servo-moteur. L'orifice de communication entre les deux biefs *A A* est armé, sur son pourtour, d'un siège sur lequel vient faire joint le cercle inférieur de la vanne *CC*. Cette vanne a la forme d'un cylindre rétréci par la base; ce cylindre est surmonté d'un chapeau *D*. Le siège *AA* supporte, par les nervures *FF*, un anneau *GG*, sur lequel s'appuie le fond mobile *HH*; ce dernier, par son pourtour, forme guidage libre sur la paroi intérieure du corps de cylindre. Par le jeu qui existe autour de ce

fond mobile, la communication s'établit entre le bief d'aval et le dessous du chapeau *DD*.

Comme la face supérieure du même chapeau reçoit la pression du bief d'amont, il en résulte que la soupape reste appuyée sur son siège en fermant l'orifice *AA*.

Mais il n'en sera plus de même si l'on vient à mettre le dessous du chapeau en communication avec l'amont; car alors, le chapeau se trouvant en équilibre entre deux pressions égales, la pression d'amont s'exercera de bas en haut sur les surfaces obliques voisines de *BB*, et le corps de vanne se soulèvera. Cet effet est obtenu au moyen de la petite soupape *K*, laquelle est manœuvrée par la tige *LL*; cette vanne, en démasquant l'ouverture pratiquée au haut du chapeau, introduit sous la cloche la pression d'amont. Il est facile de voir d'ailleurs que le chapeau prendra, par rapport à la soupape *K*, une position d'équilibre, qui dépendra uniquement des dimensions de cette soupape et du jeu existant autour de *HH*; de telle sorte que la vanne tout entière suivra docilement tous les mouvements de la tige *LL*.

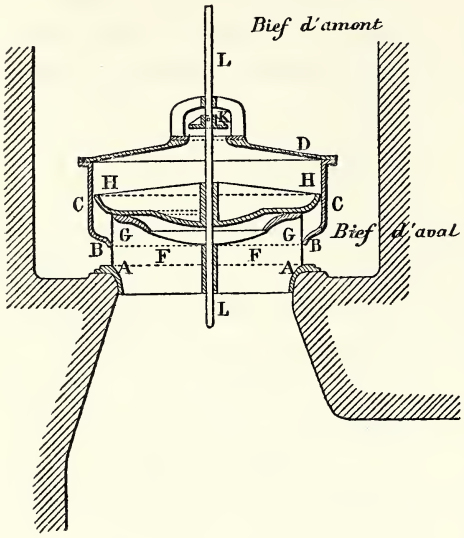


Fig. 227. — Vanne de M. Decœur.

Pour rendre encore la manœuvre plus facile, on peut remplacer la soupape plate *K* par une soupape équilibrée du genre Cornouailles. Rien n'empêche, dès lors, de se servir du système comme trop-plein de grand débit, pour maintenir constant le niveau de l'un ou l'autre des biefs. Il suffit de relier la tige *LL* à un flotteur. Une installation de ce genre a été réalisée par le service des eaux de la ville de Paris, et sert à faire passer, en cas de besoin, les eaux du réservoir de Villejuif dans le réservoir de Gentilly.

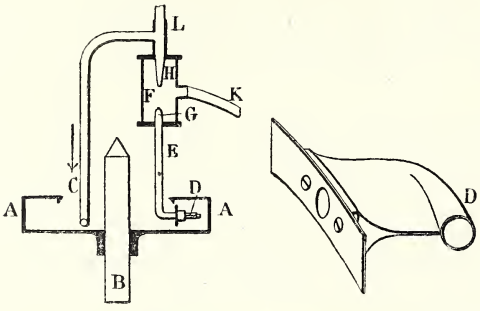


Fig. 228. — Pnéole de M. Félix de Romilly.

Sous le nom de *pnéole*, M. Félix de Romilly expose un appareil fort ingénieux, destiné au service des laboratoires et ayant pour objet de faire le vide.

L'appareil se compose de deux parties : la turbine et l'aspirateur (fig. 228).

La turbine *AA* est un plateau horizontal à rebords, fixé sur son axe *B*, lequel tourne à grande vitesse; elle reçoit du mercure, qui lui arrive par le tuyau *C*; le mercure, entraîné par la force centrifuge, vient se loger dans la rainure qui règne sur le pour-

tour du plateau; il est saisi au passage par la cuiller *D*, et s'élève dans le tuyau *E*. Le mercure, lancé à grande vitesse par l'orifice *G*, pénètre dans la buse *H*, en entraînant avec lui le gaz contenu dans la chambre *F*; le vide ainsi obtenu est transmis, par la tubulure *K*, au récipient à épuiser. Le mercure, après s'être séparé dans le tube *L* du gaz qu'il entraîne, est ramené par *C* à la turbine.

M. Parenty, ingénieur des manufactures de l'État, à Orléans, expose une série d'appareils destinés à des usages extrêmement variés. Pour donner une idée de la fécondité de cet inventeur, nous en citerons seulement quelques-uns :

Machine à fumer le tabac;

Appareils pour le lavage méthodique de diverses matières;

Jaugeurs de cours d'eau;

Partiteurs pour irrigations;

Régulateurs et compteurs à gaz, etc.

Plusieurs de ces appareils sont présentés à l'état de simple conception théorique. Nous ne retiendrons ici que quelques-uns de ceux qui ont rapport à l'hydraulique.

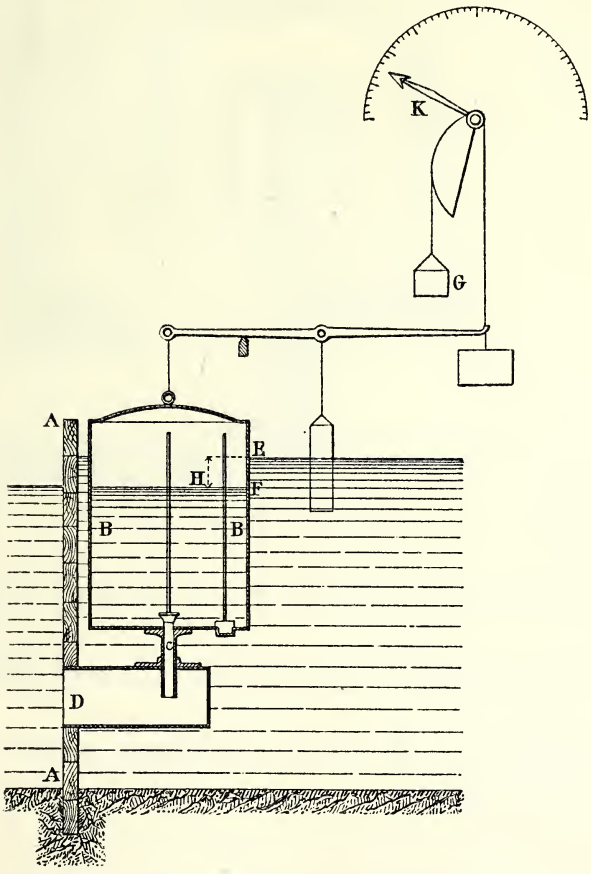


Fig. 229. — Jaugeur de M. Parenty.

Pour le jaugeage des petits cours d'eau, M. Parenty s'est donné comme programme d'établir un appareil qui donnât à chaque instant et d'une manière permanente le débit actuel. A cet effet (fig. 229), il établit, en travers du lit, un barrage fixe *AA* percé, dans le bas, d'un orifice; cet orifice étant noyé, le débit est toujours proportionnel à la racine carrée $\sqrt{H}$ de la différence de niveau entre l'amont et l'aval. C'est cette différence qu'il s'agit de traduire aux yeux. A cet effet, dans le bief d'amont, est immergée une caisse *BB* formant flotteur; l'intérieur du flotteur est mis, par *CD*, en relation avec le bief d'aval, et le niveau s'y établit à la même hauteur qu'en aval. La poussée sur la caisse est donc toujours proportionnelle à la différence *EF* à mesurer; elle est

équilibrée par divers contrepoids, dont le dernier G est suspendu par un fil à une came, taillée de telle façon que l'aiguille K se déplace d'angles proportionnels à $\sqrt{H}$. Les divisions du cadran, tracées après tarage préalable, donnent immédiatement le débit. On conçoit d'ailleurs qu'il soit facile, à l'aide d'une roulette ou autre procédé, d'intégrer les débits instantanés, de manière à obtenir le volume total écoulé pendant un temps quelconque.

La figure 230 représente schématiquement le compteur établi par M. Parenty, pour mesurer le débit d'une conduite de distribution. Un tube de Pitot à deux orifices opposés A et B est disposé dans l'axe de la conduite. Les différences de pression qui se produisent dans les deux tubes ascensionnels sont en relation avec la vitesse que prend l'eau dans la conduite, c'est-à-dire avec le débit; ces différences sont mesurées par l'appareil manométrique CC. C'est une caisse divisée par un diaphragme horizontal et mobile DD; ce diaphragme est muni sur son pourtour d'une rainure

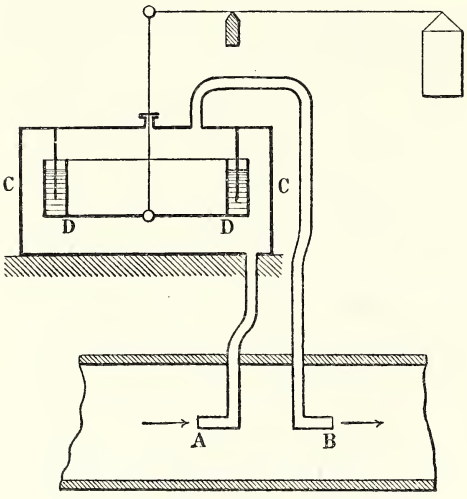


Fig. 230. — Compteur Parenty.

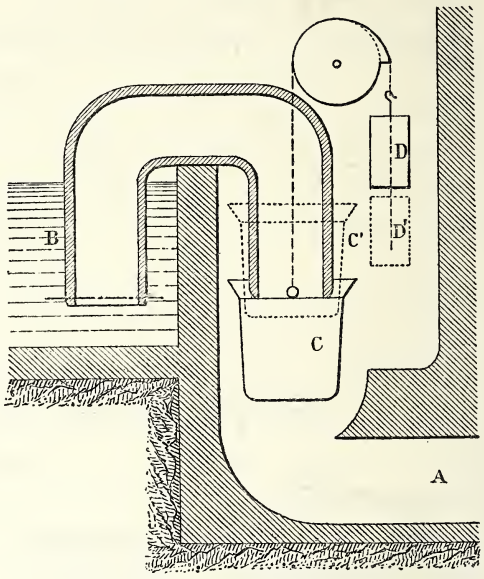


Fig. 231. — Siphon de chasse.

contenant du mercure et faisant joint hydraulique sur une cloison cylindrique qui descend du ciel de la caisse.

L'ensemble est équilibré par des contrepoids à bras de levier variable, comme dans le cas du jaugeur de cours d'eau.

Des principes analogues ont été appliqués par M. Parenty à un appareil destiné à jauger le débit des conduites de gaz ou de vapeur.

L'appareil représenté fig. 231 est un siphon de chasse, ayant pour objet d'envoyer brusquement dans un égout A l'eau lentement accumulée dans un réservoir B. Il se compose d'un siphon dont la branche descendante plonge dans un seau mobile, lequel est équilibré par un contrepoids D, à l'aide d'une chaîne passant sur une came. Lorsque

l'eau est basse dans le réservoir B, le seau est en C', en haut de sa course. Il reste dans cette position jusqu'à ce que l'eau, en s'élevant dans le réservoir, atteigne un niveau suffisant pour produire une chasse dans le siphon. Le seau, repoussé par le choc de l'eau, descend brusquement, et le siphon débite à gueule bée. Une fois le réservoir vidé, le seau remonte de lui-même sous l'action du contrepoids D.

Le jury a décerné à M. Parenty une médaille d'or pour ses ingénieuses inventions.

CHAPITRE VII.

COMPRESSION ET MOUVEMENT DES GAZ.

SOMMAIRE.

Généralités. — Division.

De l'air comprimé. — Transmission par l'air sous pression. — Effets des variations de température. — Moyens de les atténuer. — Pressions en usage. — Canalisations. — Récepteurs. — Transmission par le vide.

Partie descriptive. — Distribution Popp. — Compresseurs de Burckhardt, de Thirion, de Mékarski, de Sautter et Lemonnier, de Brotherhood. — Distribution par le vide de Boudenoot.

Ventilateurs. — Ventilateurs volumogènes de Skinner, de Mortier (Biétrix). — Ventilateurs à inertie de Geneste et Herscher, de Blackmann, de la Société Électricité et Hydraulique. — Ventilation par entraînement, de Vabe.

Moulins à vent. — Panémones.

La mécanique des gaz est beaucoup moins avancée que celle des liquides; elle est aussi bien plus complexe et plus difficile. Un liquide peut être pratiquement considéré comme invariable de volume; la chaleur ne produit sur lui que des effets négligeables, du moins en deçà du point où commence la transformation en vapeur. Pour les gaz, il en est tout autrement : ils sont éminemment compressibles et extrêmement sensibles à l'action de la chaleur; ces deux propriétés introduisent, dans les théories et dans les recherches expérimentales, des complications qui, dans bien des cas, sont demeurées insurmontables. Cependant, des progrès très importants ont été réalisés, depuis que les relations qui relient le travail à la chaleur ont été nettement établies, depuis qu'a été fondée cette belle et utile science qu'on désigne sous le nom de *thermodynamique.*

De même que pour les liquides, l'étude des gaz comporte deux grandes divisions : la *pneumostatique,* dans laquelle le fluide est considéré à l'état de repos, et la *pneumodynamique,* où il est considéré à l'état de mouvement.

Relativement aux gaz à l'état de repos, la plupart des données physiques nécessaires pour le calcul des applications ont été établies avec une précision suffisante par les travaux persévérants de nombreux et illustres expérimentateurs. Néanmoins, il subsiste encore, dans cet ensemble, de sérieuses et regrettables lacunes; entre beaucoup d'autres, il convient de citer l'absence presque complète des coefficients propres à définir la transmission de la chaleur, soit d'un point à l'autre d'une masse gazeuse, soit entre cette masse et les parois qui la contiennent. Il y aurait cependant, dans nombre de cas, un intérêt majeur à posséder ces données.

En ce qui concerne les gaz en mouvement, les lacunes sont encore bien plus graves et plus étendues; à part quelques chiffres expérimentaux sur la résistance au frottement dans les conduites, on est presque dépourvu de toute indication un peu précise; le plus souvent, dans les applications, on est réduit à échafauder les calculs sur des

hypothèses plus ou moins probables, auxquelles la pratique donne parfois de cruels démentis. Pour n'en citer qu'un exemple, cette absence de données a été une des causes les plus efficientes, qui ont entravé jusqu'à ce jour la solution d'un des problèmes que les mécaniciens poursuivent avec ardeur, la navigation aérienne.

Au point de vue des applications, les appareils mécaniques dans lesquels les gaz entrent en jeu se divisent naturellement en deux grandes classes, correspondant aux deux catégories que nous avons définies ci-dessus, savoir : ceux dans lesquels le gaz peut être considéré comme à l'état statique, et ceux dans lesquels intervient principalement le mouvement du fluide. Cette dernière classe comporte elle-même deux subdivisions : celle des appareils agissant comme moteurs sur le fluide et celle des appareils qui reçoivent leur action du fluide en mouvement.

Tel est l'ordre que nous suivrons dans le présent chapitre. Nous étudierons successivement :

Les machines pneumostatiques;

Les moteurs pneumodynamiques, tels que les ventilateurs;

Les récepteurs pneumodynamiques, tels que les moulins à vent.

Un appareil pneumostatique se compose essentiellement d'un récipient à volume variable, tel qu'un cylindre avec piston, renfermant une masse de gaz qui successivement y est comprimée et dilatée, sans que les molécules gazeuses y prennent des accélérations notables. Dans la pratique, c'est souvent sur l'air atmosphérique que l'on agit.

Depuis quelques années, les emplois de l'air comprimé, qui étaient restés pendant longtemps à l'état d'applications isolées, se sont singulièrement développés. On se sert de l'air comprimé comme réservoir de puissance motrice, pour la traction des voitures de tramways; on s'en sert également dans le fonçage des fondations difficiles et profondes, pour l'obtention de très basses températures, la conservation des aliments, etc. Mais l'emploi le plus répandu et le plus général, c'est la transmission à distance et la distribution de la puissance motrice. C'est qu'en effet, pour ce dernier objet, l'air comprimé offre les facilités les plus précieuses. Il permet, à l'aide d'une canalisation légère et souple, d'atteindre les recoins les plus éloignés des chantiers; il ne dégage ni chaleur, ni émanations malsaines; il peut même, après avoir actionné les outils, constituer un puissant moyen d'assainissement.

Il y a près d'un demi-siècle que Colladon proposa l'emploi de l'air comprimé pour l'exécution d'une œuvre grandiose, qui présentait des difficultés considérées à cette époque comme presque insurmontables : le percement des Alpes au Mont-Cenis, pour l'établissement du chemin de fer de France en Italie. Grâce au concours d'ingénieurs habiles, les Grattoni, les Sommellier, les Grandis, le procédé réussit complètement. Ce premier essai, couronné d'un succès éclatant, servit de point de départ à de nombreuses et importantes applications, parmi lesquelles il convient de rappeler le percement des tunnels du Saint-Gothard et de l'Arlberg. Aujourd'hui, l'air comprimé est

entré d'une manière courante dans l'outillage des industries du mineur, et il est employé, dans certains cas, sur une échelle extrêmement vaste.

Une distribution de travail par l'intermédiaire de l'air comprimé comporte trois parties essentielles : les compresseurs, la canalisation et les récepteurs actionnant les outils. Les compresseurs, sous l'action d'une puissance motrice extérieure, agissent à la façon d'une pompe foulante; ils puisent l'air dans l'atmosphère et le compriment sous une pression plus ou moins élevée. La canalisation distribue cet air comprimé aux divers récepteurs, dans lesquels l'air agit; après avoir développé du travail moteur, cet air est renvoyé dans l'atmosphère. Le cycle est donc complet. Or, l'air constitue un ressort d'une élasticité indéfinie. Il semblerait donc, abstraction faite des frottements, des fuites et autres résistances passives, que l'on dût retrouver sur les récepteurs la totalité du travail consommé par les compresseurs.

Il est loin d'en être ainsi : par le fait des changements successifs de volume, il se produit une série de phénomènes thermiques, qui exercent la plus fâcheuse influence sur les résultats obtenus. L'air s'échauffe par la compression et cet échauffement peut devenir considérable; une fois lancé dans la canalisation, il reprend progressivement la température ambiante; arrivé au récepteur, il se détend, et cette détente est accompagnée d'un refroidissement qui, non seulement représente une perte importante de travail, mais peut aussi être assez intense pour congeler les huiles et paralyser le jeu des organes. Perte de travail au départ, perte de travail à l'arrivée, en somme, rendement médiocre, sans compter les difficultés pratiques résultant de ces variations de température, tels sont les obstacles qui se sont élevés, dès les premières applications que l'on eut à faire de l'air comprimé.

Grâce aux données très précises que l'on possède sur quelques-unes des propriétés physiques des gaz, grâce aussi aux notions fournies par la thermodynamique, ces sortes de problèmes sont, théoriquement parlant, accessibles au calcul. Mais, pour passer aux applications, il est indispensable de tenir compte de l'influence calorifique des parois qui renferment le fluide; et cette influence ne peut être calculée exactement, faute de données suffisamment certaines.

Quoi qu'il en soit, dès les premiers jours, les plus grands efforts ont été faits pour atténuer ces effets désastreux.

En ce qui concerne les compresseurs, pour éviter les élévations exagérées de température, on met, pendant la compression, l'air en contact avec des surfaces froides, aussi développées et multipliées que possible. On rafraîchit, par une circulation d'eau, les parois des cylindres et pistons. On maintient la masse d'air à comprimer en contact avec de l'eau, ou, mieux encore, on injecte dans cette masse de l'eau en poussière.

Un des procédés qui ont le mieux réussi, surtout lorsqu'il s'est agi d'obtenir des pressions élevées, c'est de diviser la compression totale en deux ou plusieurs phases,

opérées dans des cylindres différents; ce procédé n'est autre que l'application aux compresseurs d'air du système compound, qui a eu tant de succès en matière de machines à vapeur. Dans le cas actuel, l'air ne subissant, dans chaque cylindre, qu'une compression modérée, l'échauffement et les pertes de travail qui en résultent sont assez faibles. Dans le passage d'un cylindre à l'autre s'opère le refroidissement; et ainsi, l'ensemble de l'opération se passe à peu près comme si la température du fluide était demeurée constante. Lorsqu'il s'agit d'obtenir de l'air fortement comprimé et sec, le compoundage des cylindres est forcément imposé; mais même dans les autres cas, le système se combine utilement avec le refroidissement direct.

A l'aide de ces divers procédés, et par une construction soignée, on est parvenu à comprimer de l'air sous des pressions fort élevées. Pour les transmissions ordinaires, des pressions de 6 à 10 kilogrammes par mètre carré sont couramment employées. Lorsqu'il s'agit d'emmagasiner sous un petit volume des quantités de travail un peu considérables, on comprime, dans de solides réservoirs, de l'air à 25 à 50 kilogrammes de pression. Des pressions de 100 à 120 kilogrammes sont usitées couramment pour le remplissage des torpilles automobiles. Enfin, pour certaines applications, on en est arrivé à des pressions de 1,000 kilogrammes et au delà. Pour les usages des industries chimiques et des laboratoires, on fabrique des gaz comprimés : ammoniac, oxygène, acide carbonique, qui sont livrés dans de petits récipients en acier ou en fer, fort commodes et maniables, sous des pressions de 20 à 100 kilogrammes.

Les conduites de gaz comprimé ne donnent lieu à aucune remarque particulière; elles s'établissent d'après les règles de la construction ordinaire. Un seul point appelle quelque attention, c'est la confection des joints, lesquels doivent être tenus très étanches, sous peine de fuites considérables.

Lorsqu'il s'agit d'une distribution d'air comprimé, envoyé par une usine centrale à un grand nombre de récepteurs, il arrive ordinairement que chacun de ces récepteurs est une machine d'une puissance assez petite, qui ne consomme qu'une quantité faible de fluide sous pression. Dès lors, le refroidissement causé par la détente est peu gênant; les organes, de faible volume, tendent à se mettre en équilibre de température avec l'atmosphère, qui agit, dans ce cas, comme un calorifère actif et réchauffe efficacement l'air et les parois qui le contiennent. Le plus souvent, en pareil cas, on se contente de dispositions simples; le rendement, il est vrai, est sacrifié; mais, pour de petits appareils, c'est là une question un peu secondaire, en comparaison surtout de la commodité d'emploi.

Il n'en est pas de même pour les récepteurs de grande puissance; la bonne utilisation de l'air comprimé devient une question capitale. On a pu, dans quelques applications, tirer parti de l'air très froid qui s'échappe des moteurs à air comprimé, pour

entretenir à basse température des chambres destinées à la conservation des aliments; le fluide fournit ainsi à la fois le froid et le travail. Pour empêcher la congélation des huiles et l'entraînement des neiges produites par la vapeur d'eau dissoute dans l'air comprimé, on fait usage de dispositifs et de lubrifiants appropriés. On conçoit d'ailleurs que des combinaisons de cette nature ne sont admissibles que dans certains cas tout à fait particuliers, où il y a une sorte d'équivalence entre la quantité de froid que doit fournir l'appareil et la quantité de travail qu'il a à développer. Lorsque l'objet principal du récepteur est de donner du travail, le procédé le plus efficace consiste à chauffer l'air comprimé à son entrée dans la machine. Non seulement on échappe ainsi aux graves difficultés d'ordre pratique qui proviennent du refroidissement, mais encore on arrive à ce résultat remarquable, d'utiliser, d'une façon aussi parfaite que possible, la chaleur incorporée à l'air comprimé. Une machine à vapeur ne transforme en travail utilisable que 8 à 10 p. 100, au maximum, de la chaleur que peut dégager le combustible qu'elle consomme; la proportion est un peu plus favorable, 12 à 16 p. 100, pour les machines à gaz. Or, en chauffant l'air comprimé, on peut élever le rendement dynamique de la chaleur théoriquement jusqu'à l'unité et, en fait, jusqu'à un chiffre voisin de l'unité.

On peut aussi, par ce procédé convenablement appliqué, retrouver sur le récepteur une quantité de travail égale ou même supérieure à celle dépensée sur le compresseur. Les expériences ont été faites à plus d'une reprise, et les résultats sont incontestables.

Si les expériences ont réussi, expériences de courte durée, ce n'est pas à dire pour cela que le système soit entré définitivement dans la pratique. Le chauffage de l'air comprimé présente de grandes difficultés, si l'on veut que les appareils soient durables, faciles à conduire, et qu'ils n'exigent pas trop d'entretien. Le chauffage dans des tuyaux plongés dans les flammes d'un foyer n'a pas donné de bons résultats : en peu de temps, les tuyaux s'oxydent et les joints fuient. On a essayé d'injecter dans l'air des flammes de gaz d'éclairage, combustible cher, mais commode : la flamme s'éteint ou devient fumeuse. L'injection d'un jet de vapeur nécessite la présence d'un foyer et d'une chaudière; c'est la suppression de tous les avantages de simplicité, de facilité d'emploi, d'absence de danger qu'on demande à l'emploi de l'air comprimé. Dans les cas où l'on ne demande au récepteur qu'un travail de peu de durée, on a pu se servir avec succès de la chaleur accumulée dans un réservoir contenant de l'eau à haute température; l'air barbote à travers l'eau, avant d'être délivré au récepteur, à l'état humide et chaud, c'est-à-dire dans de bonnes conditions d'emploi. Le réservoir d'eau chaude est ramené par intervalles auprès d'une chaudière à haute pression, qui renouvelle sa provision de chaleur.

En somme, la question n'est pas résolue, au moins d'une manière générale; eu égard à l'intérêt qu'elle présente, il est à désirer qu'elle soit soumise à de nouvelles études.

Dans quelques installations récentes, la distribution du travail se fait, non plus par l'air comprimé, mais par le vide. L'usine centrale, munie de pompes pneumatiques, aspire l'air contenu dans la canalisation et le refoule dans l'atmosphère. Les récepteurs, branchés sur la conduite générale, ont leur admission en relation avec l'air extérieur et l'échappement en communication avec cette conduite. Les effets thermiques, dont nous avons parlé précédemment, se produisent encore ici, mais sur une échelle bien moins étendue, les pressions entre lesquelles s'inscrit le cycle des opérations étant beaucoup moins écartées. D'autre part, les pertes de charge, même modérées, prennent une valeur relative qui devient importante, eu égard au faible écart des pressions extrêmes; de ce fait, il résulte que la longueur des conduites est forcément limitée; un réseau fonctionnant d'après ce principe ne saurait donc avoir une portée et une étendue comparables avec ce que l'on peut obtenir à l'aide de l'air comprimé.

Les généralités qui précèdent nous permettront de passer rapidement sur l'étude purement descriptive des machines qui fonctionnent à l'aide des gaz à l'état statique. Nous devrons, dans cette étude, laisser de côté tous les appareils (et ils sont en grand nombre) qui sont destinés à des industries spéciales, telles que la guerre, la marine, la métallurgie, les mines, les industries alimentaires. Si intéressants, même au point de vue mécanique, que puissent être ces appareils, ils ressortissent, par leur nature ou leur destination, à d'autres classes que celle de la mécanique générale; ce n'est donc pas ici le lieu d'en faire l'examen.

Nous débuterons, dans ces études descriptives, par celle d'une des plus vastes installations qui existent, la distribution d'air comprimé exploitée par la Compagnie parisienne de l'air comprimé, procédés Victor Popp.

Cette industrie, aujourd'hui très étendue, a eu des débuts fort modestes : elle comportait, en 1871, une faible usine de compression, qui était établie dans le sous-sol d'une maison à loyer de la rue Sainte-Anne, et qui délivrait de l'air comprimé à une petite distribution, pour donner l'heure à quelques horloges dites *pneumatiques*. De proche en proche, elle s'est rapidement développée.

Aujourd'hui [1], l'usine centrale, transférée rue Saint-Fargeau, comporte le matériel ci-après :

Onze générateurs de vapeur;

Six machines à vapeur, d'une puissance totale de 2,000 chevaux;

Douze compresseurs d'air actionnés par ces machines;

Un château d'eau pour le refroidissement de l'eau de condensation ;

Des réservoirs d'air comprimé ;

Enfin des ateliers de réparation et autres accessoires.

[1] Situation au moment de l'Exposition de 1889; depuis cette époque, la distribution a reçu des développements considérables, et comme puissance motrice, et comme extension de la canalisation.

Les terrains appartenant à la Société permettent d'augmenter ce matériel dans une large mesure.

Voici les dimensions et dispositions principales de quelques-uns de ces appareils :

Générateurs de vapeur. — Ils sont du type semi-tubulaire. Surface de chauffe de chaque chaudière, 122 mètres carrés.

Machines motrices. — Elles sont du système compound, horizontales, à condensation et à deux cylindres agissant sur un arbre à manivelles.

Diamètre du cylindre à haute pression	557 millim.
Diamètre du cylindre à basse pression	888
Course commune	1,219
Nombre de tours en allure normale	38 tours.
Puissance de chaque machine, environ	350 chev.

Distribution au cylindre de haute pression par deux tiroirs superposés, le tiroir de détente étant actionné par une coulisse, sous l'action du régulateur. Distribution par tiroir simple au cylindre de basse pression.

Compresseurs. — Ils sont à double effet, du système Sturgeon, montés en tandem à la suite de chacun des cylindres moteurs :

Diamètre du cylindre	600 millim.
Course	1,219

Les soupapes d'aspiration sont montées sur les boîtes à étoupes de la tige du piston, et, par conséquent, s'ouvrent et se ferment lorsque le piston est à bout de course. Le système de réfrigération consiste en un filet d'eau, qui s'écoule devant chaque soupape d'aspiration; cette eau est entraînée et se mélange à l'air aspiré.

Réservoirs d'air comprimé. — Ce sont de grands cylindres en tôle, au nombre de huit, chacun d'une capacité de 32.5 mètres cubes. C'est dans ces réservoirs que l'eau entraînée se sépare par décantation.

La *canalisation principale* se compose d'une conduite en fonte de 300 millimètres de diamètre; elle se détache de l'usine centrale, descend, par Ménilmontant, à la place de la République, pour arriver, par les grands boulevards, jusqu'à la Madeleine; sa longueur est de 7 kilomètres; les joints sont en caoutchouc; la conduite est attachée à la paroi des égouts. De la conduite maîtresse se détachent les branchements particuliers. La pression dans la conduite principale est maintenue aux environs de 6 kilogrammes. Les pertes de charges et les fuites sont peu importantes.

La distribution dont il s'agit dessert un assez grand nombre d'industries, auxquelles elle fournit principalement de la puissance motrice. Pour les petites forces, on utilise l'air comprimé dans des moteurs rotatifs; mais, dans la plupart des cas, les récepteurs sont à piston et reproduisent les dispositions vulgaires des machines à vapeur.

Dans quelques applications, on se sert de l'air d'échappement, détendu et froid, pour conserver des aliments dans des chambres à basse température. Dans les cas les

IMPRIMERIE NATIONALE.

plus ordinaires, le froid ne peut être utilisé; il deviendrait alors avantageux, surtout si le travail demandé aux récepteurs est un peu considérable, de réchauffer cet air avant de l'admettre dans la machine. On a essayé de le faire par divers procédés, notamment en faisant circuler l'air dans des tuyaux chauffés; le chauffage est obtenu par la combustion du coke, disposé dans un poêle à feu continu, lequel n'a besoin d'être rechargé qu'à de rares intervalles; le système est encore à l'état d'essai.

On se sert aussi de l'air comprimé pour élever de l'eau, pour actionner des ascenseurs et monte-charges, pour le remontage et la mise à l'heure des horloges, etc.

MM. Burckhardt et Weiss se sont proposé un problème assez difficile : établir un compresseur à grande vitesse et à rendement élevé. La grande vitesse permet de réduire le poids et le prix de l'appareil, et surtout son encombrement, ce qui, dans bien des cas, est un avantage de premier ordre; d'autre part, aux allures rapides, les obturateurs automobiles, tels que les soupapes ordinaires, ne font plus un bon service. Les inventeurs ont eu recours, comme organe distributeur, au tiroir en coquille actionné par un excentrique circulaire.

Les brevets Burckhardt et Weiss sont exploités par divers constructeurs : à Bâle, par MM. Burckhardt et Cie; en Belgique, par MM. Émile Hallot et Cie; en France, par la Société des anciens établissements Cail. Les dispositions données à l'appareil varient avec le service à faire et les circonstances locales; l'une de ces dispositions, assez fréquemment adoptée, est représentée par la figure 232.

La machine comporte un moteur à vapeur *A* et le compresseur proprement dit *B*, attelés sur un arbre commun *CC* à deux vilebrequins *D*, *E*. Ces deux vilebrequins ne sont pas à angle droit, mais le vilebrequin à air *E* est calé à 45 degrés environ en avant du vilebrequin à vapeur *D*, de manière à atténuer autant que possible les écarts entre le moment moteur et le moment résistant. La machine motrice est à détente variable, système Rider, sous l'action du régulateur.

Le compresseur est sec, mais les parois et les fonds du cylindre sont rafraîchis par une circulation d'eau. La distribution, qui est la partie la plus intéressante de l'appareil, est donnée par un tiroir en coquille *F*, conduit par un excentrique circulaire; l'admission d'air se fait par la lumière centrale *a*, et le refoulement a lieu dans une boîte *G*, par l'intermédiaire de deux lumières *bb'*, percées à travers la masse du tiroir.

Si l'on étudie d'un peu près le fonctionnement d'un pareil système, on s'aperçoit bientôt que, pour obtenir le degré de compression voulu, il serait nécessaire que les barrettes fussent munies de larges recouvrements, tant intérieurs qu'extérieurs; qu'il en résulterait nécessairement des avances exagérées, entraînant une diminution considérable du rendement en volume et une perte énorme d'effet utile. Les inventeurs ont tourné cette difficulté par des artifices fort ingénieux.

Le dos du tiroir est muni d'une plaquette légère, qui agit à la façon d'une soupape, pour fermer les lumières *b* et *b'*; elle est appuyée sur son siège par un double ressort

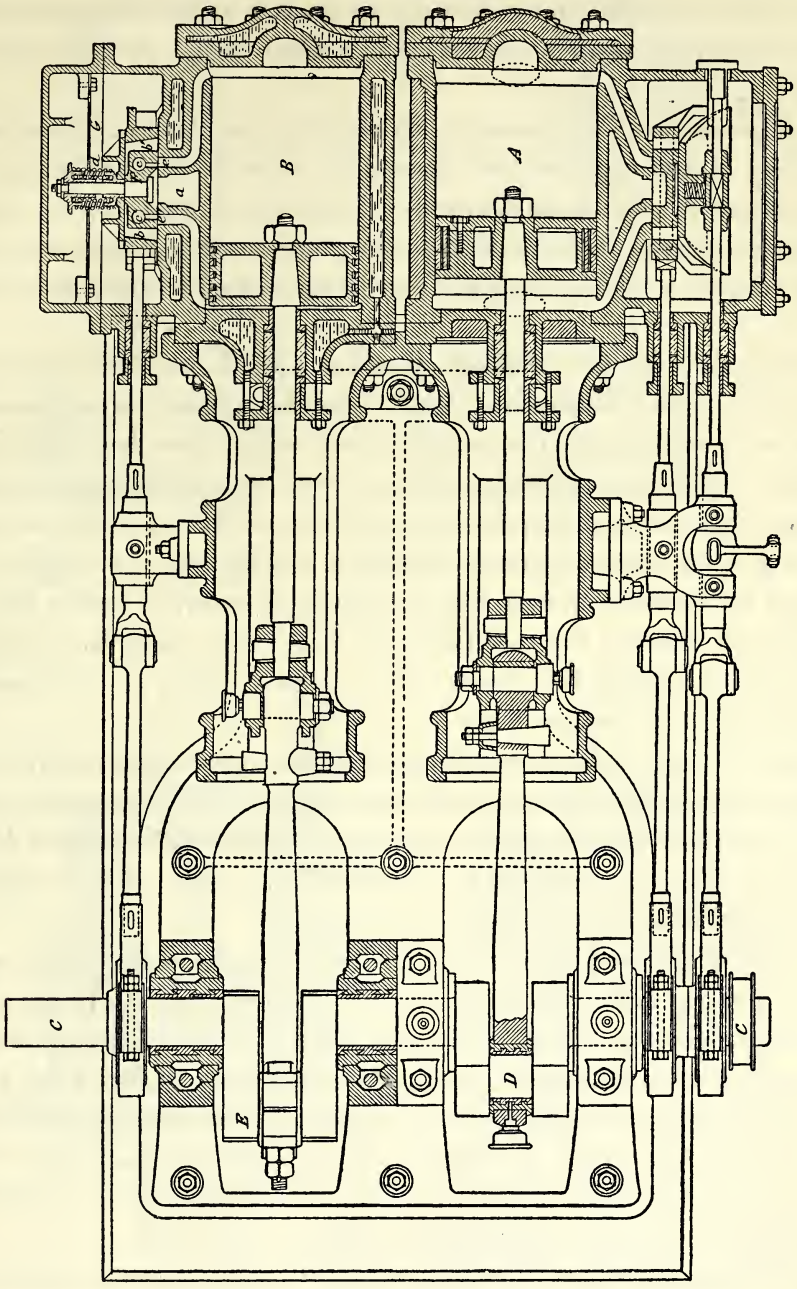


Fig. 232. — Compresseur Burckhardt.

à boudin très doux *d*; les lumières *b* et *b'* s'épanouissent aux abords du contact, de manière à élargir les surfaces offertes à la pression et les sections d'écoulement du fluide comprimé; la levée de cette soupape se trouve ainsi fortement réduite.

Pour atténuer l'effet des retards à l'admission de l'air, on a pratiqué, sur la face d'appui du tiroir, deux petites lumières supplémentaires *e e'*, qui sont réunies par un canal *c c* percé dans la masse du tiroir. Lorsque le piston approche de l'extrémité de

sa course, la face comprimante est mise par ces lumières en communication avec la face aspirante; les espaces neutres se vident, et le système est prêt pour l'excursion rétrograde.

Grâce à ces artifices, à un graissage très soigné et à des détails de construction fort bien étudiés, on peut imprimer à cet appareil des vitesses considérables, 100 révolutions par minute et même davantage, tout en conservant au rendement en volume une valeur qui est rarement atteinte, même par les compresseurs à allure lente et à refroidissement complet. Aussi cette machine s'est-elle rapidement répandue dans l'industrie.

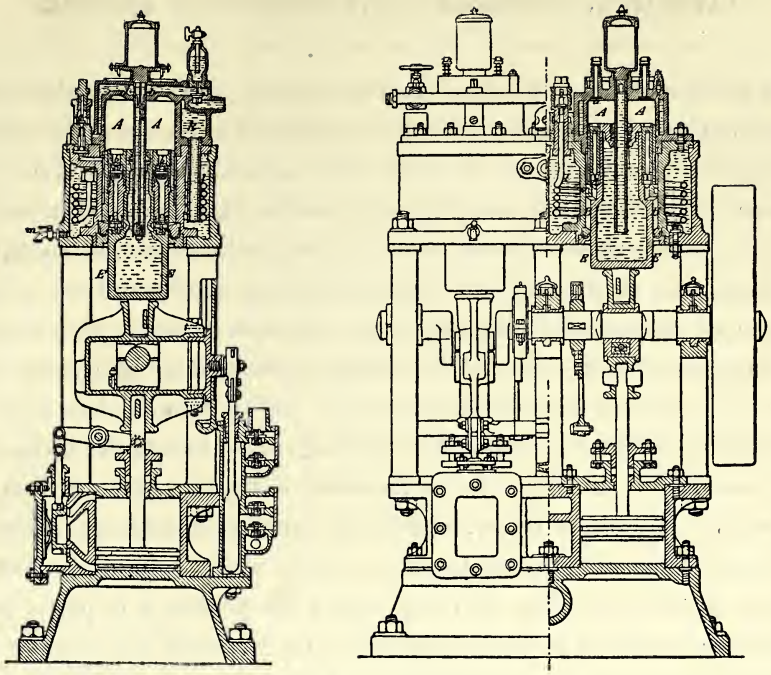
On sait que dans la guerre maritime, il est fait usage de torpilles dites *automobiles;* ce sont de petits navires sous-marins, armés d'une charge d'explosif, qu'ils ont mission d'attacher aux œuvres vives de l'ennemi; ils portent en eux-mêmes la provision d'énergie qui doit leur imprimer le mouvement. Cette provision est ordinairement constituée par un réservoir d'air fortement comprimé, qui est délivré, au fur et à mesure de la marche de l'appareil, à un minuscule moteur actionnant le propulseur. La charge est renouvelée, avant le lancement, par la mise en relation du réservoir mobile porté par la torpille avec un réservoir fixe, préalablement rempli d'air comprimé. Les pressions dans ce réservoir fixe sont fort élevées, elles atteignent 100 à 120 kilogrammes. Ils sont chargés à l'aide de pompes à air.

La figure 233 représente la pompe à vapeur établie pour cet objet par M. A. Thirion, constructeur à Paris. Elle est remarquable par ses dispositions d'ensemble, aussi bien que par les détails; le groupement des organes a été combiné de manière à réduire, autant que possible, l'encombrement, ce qui est indispensable pour les applications spéciales auxquelles ces sortes d'appareils sont consacrés.

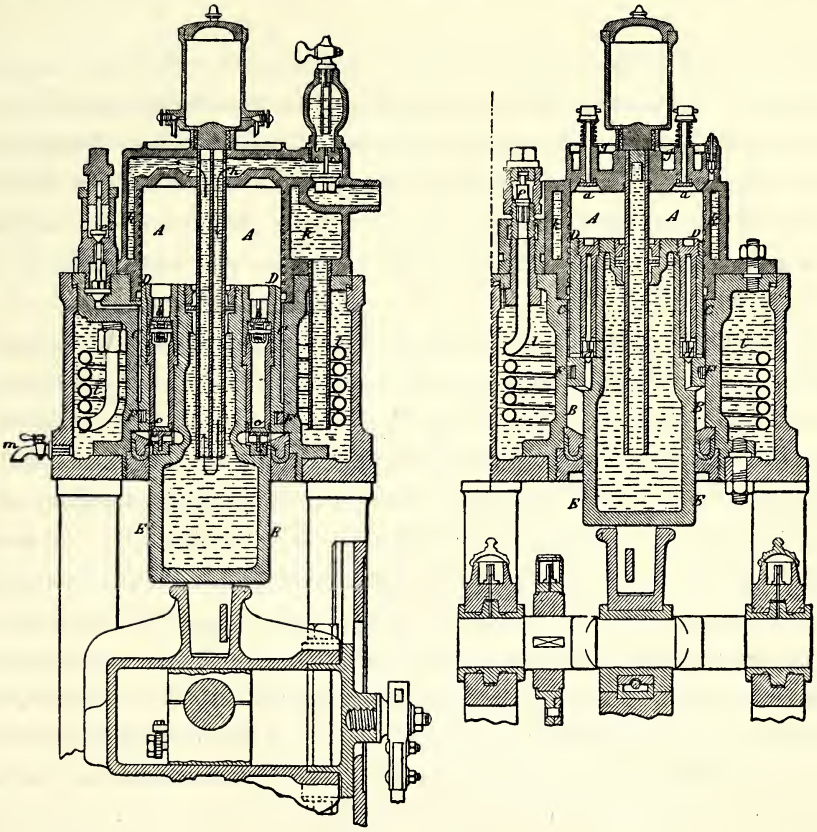
Le système est double et comporte deux cylindres à vapeur et deux corps de pompe. Les pistons à vapeur agissent directement sur les pistons à air; sur la tige commune est intercalée une coulisse, faisant fonction de bielle, laquelle manœuvre un arbre à volant, muni de deux vilebrequins croisés; cette disposition est tout à fait acceptable dans le cas actuel, où l'arbre de couche fonctionne, non pas comme organe de transmission, mais comme organe de régulation. L'arbre porte les excentriques actionnant les tiroirs de distribution des cylindres à vapeur. Sur le côté du cadre est montée la tige de la pompe, qui envoie l'eau de rafraîchissement.

L'organe le plus intéressant de cet appareil est la pompe qui sert à comprimer l'air. La compression se fait en trois temps, par un seul coup du piston, qui est à simple effet. Le premier temps a lieu dans la partie supérieure du corps de pompe *AA*; le deuxième s'effectue dans l'espace annulaire *BB*; la compression finale est produite dans l'espace annulaire *CC*; à cet effet, le piston comporte trois parties de diamètres différents *DD*, *EE*, *FF*.

Les garnitures sont en disques de cuir pressés et en cuir embouti de Bramah; les soupapes sont : à l'aspiration, *aa*; au premier refoulement (soupapes doubles), *bb*



Ensemble de l'appareil.



Détail des cylindres.

Fig. 233. — Compresseur Thirion.

et *cc*; entre la moyenne et la haute pression, *dd*; enfin, pour le refoulement final, *e*; *f* est la soupape de retenue à l'origine de la conduite qui mène l'air comprimé au réservoir fixe. Le refroidissement est opéré de la manière suivante : l'eau est élevée par la pompe à double effet manœuvrée par la coulisse qui réunit le piston à vapeur au piston à air; elle se divise en deux courants desservant le refroidissement intérieur et le refroidissement extérieur. Pour le refroidissement intérieur, l'eau se répand en couche mince sur le tamis métallique *gg*, que l'air doit traverser pour se rendre aux soupapes d'aspiration; cette eau, à l'état de fines gouttelettes, est entraînée par l'air et voyage avec lui jusqu'à la sortie de l'appareil; elle se décante alors dans un réservoir spécial. Pour le refroidissement extérieur, l'eau circule le long des surfaces qui sont en contact avec l'air échauffé par la compression; en *h*, elle pénètre dans un tuyau plongeant dans le piston; ce tuyau, divisé par une cloison médiane, oblige la circulation à s'établir dans le creux du piston; la sortie se fait en *j*; de là, l'eau se rend en *kk*, autour du haut du corps de pompe; puis elle pénètre à la partie basse en *ll*, où elle baigne à la fois la paroi du cylindre et un serpentin que traverse l'air comprimé et humide; elle sort par la décharge *m*. A son allure normale de 300 tours à la minute, l'appareil donne dans une heure 500 litres d'air comprimé à 100 atmosphères.

M. Mékarski est l'un des ingénieurs qui se sont le plus occupés de la question de l'air comprimé; c'est à ses recherches ingénieuses et persévérantes que l'on doit, en partie, les progrès remarquables que cette industrie a réalisés dans ces dernières années. Entre autres applications dues à M. Mékarski, on peut citer le service de la traction sur le réseau des tramways de Nantes et sur celui des chemins de fer nogentais. La technique tout entière de l'air comprimé s'est enrichie de procédés nombreux imaginés par cet inventeur.

L'exposition de M. Mékarski ne donnait qu'une idée assez faible des travaux qu'il a accomplis; et en effet, les appareils qu'il a récemment créés, et qui présentent le plus grand intérêt pour les mécaniciens, n'étaient pas encore terminés au moment de l'ouverture de l'Exposition, ou bien avaient dû être éliminés pour des raisons de sécurité. On voyait figurer, dans la classe 61, une voiture automobile à air comprimé, construite pour faire le service des chemins de fer nogentais. Dans la classe 52, on remarquait une série d'appareils exécutés, d'après les études de M. Mékarski, par la maison Brissonneau, Deroualle et Lotz, de Nantes. C'était d'abord un appareil à comprimer l'air à 120 atmosphères, pour le chargement des torpilles automobiles, avec son magasin d'air comprimé et sa colonne de purge; puis un réchauffeur d'air, pour distribution de puissance motrice; enfin un réservoir destiné à contenir de l'air comprimé à 1,000 atmosphères. Malheureusement le compresseur qui devait procurer cette énorme pression n'avait pu être exposé; il serait donc hors de propos d'en donner la description. Toutefois, la machine en question ayant été mise en service avant la clôture de l'Exposition, la chose semble assez importante et assez caractéristique pour qu'il soit utile de la

mentionner. C'est le 26 juillet 1889 que l'appareil, installé à Nantes dans les ateliers du constructeur, a fait sa première opération. En moins de dix minutes, la machine fabriqua 20 litres d'air comprimé à 1,050 atmosphères. L'opération est d'ailleurs régulière, silencieuse, et se présente avec un caractère véritablement industriel. Jusqu'alors, en dehors des laboratoires, où l'on n'opère que sur des quantités minimes de matières, la réalisation de ces pressions excessives n'avait jamais été obtenue. Il y a là un fait considérable, qui peut avoir des conséquences d'une haute importance. C'est pourquoi nous avons cru utile de le rappeler.

MM. Sautter, Lemonnier et Cie, de Paris, exposent deux compresseurs, commandés par courroie. Le premier est destiné à l'exploitation des mines de Lens, dans lesquelles les emplois de l'air comprimé ont pris une extension considérable. Ses dimensions principales sont :

Diamètre du cylindre	240 millim.
Course du piston	320

A son allure normale de 75 tours par minute, il absorbe 15 chevaux de puissance et fournit à l'heure 21 m. c. 7 d'air comprimé à 5 atmosphères. Le refroidissement est obtenu par circulation extérieure et par injection d'eau pulvérisée.

Le second compresseur a pour objet de fournir l'air comprimé à des sirènes, donnant des signaux sonores, pour suppléer les signaux optiques fournis par les phares, et qui deviennent impuissants en temps de brume. Il est à deux cylindres, placés en tandem, ayant une course commune de 0 m. 400 et 0 m. 300, et 0 m. 125 de diamètre. Le grand piston est seul utilisé, en allure normale, pour alimenter la sirène. Le deuxième piston ne sert qu'à charger l'accumulateur; il emprunte l'air, comprimé préalablement à 6 kilogrammes dans le premier cylindre, et en élève la pression à 15 kilogrammes. Le mode de refroidissement est le même que dans l'appareil qui vient d'être décrit.

L'accumulateur est un réservoir dans lequel on tient en réserve un approvisionnement d'air suffisant pour subvenir aux manœuvres inopinées.

La figure 234 représente un compresseur anglais pour le service des torpilleurs. Ce type de compresseur est établi par la maison Peter Brootherhood, de Londres, célèbre par ses machines à vapeur à trois cylindres convergents et à allures rapides. L'appareil se compose de deux cylindres à vapeur latéraux A et A' et d'un cylindre central B, qui est le corps de pompe. Les pistons à vapeur agissent aux deux bouts d'une traverse CC', sur le milieu de laquelle sont attelés, d'une part, le piston à air, d'autre part, la bielle actionnant l'arbre tournant DD', sur lequel sont montés deux volants. La compression se fait en trois temps, comme dans le compresseur Thirion, précédemment décrit, et par des procédés analogues; le refroidissement s'opère aussi de la même manière. A la

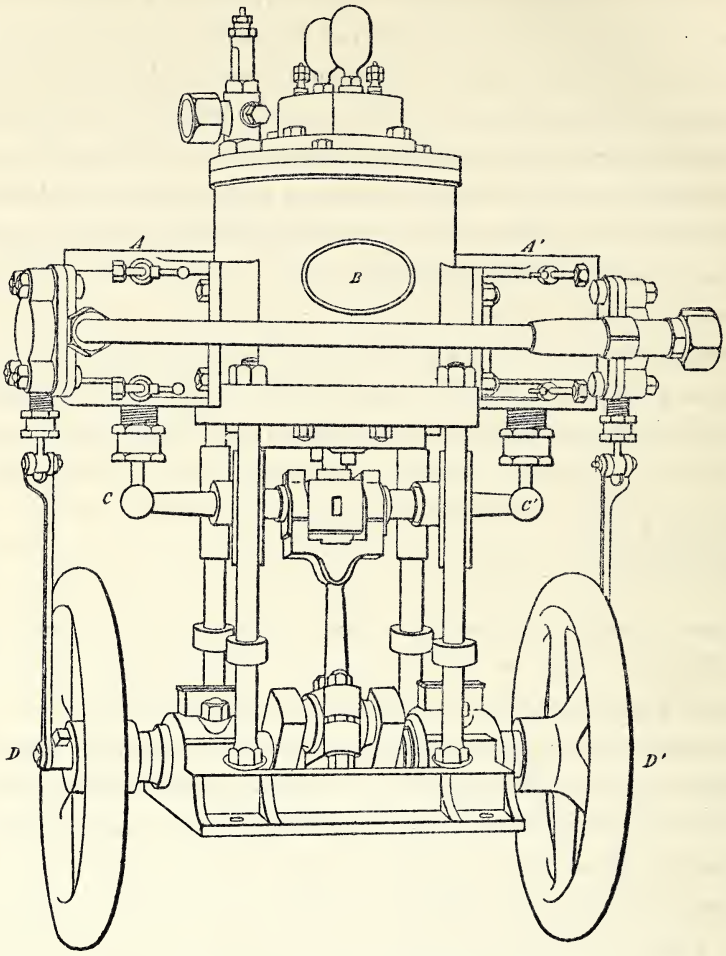


Fig. 234. — Compresseur Brotherhood.

vitesse de 350 révolutions par minute, cet appareil fournit, par heure, environ 40 mètres cubes d'air comprimé à 100 atmosphères.

Ce n'est pas seulement l'air comprimé qui a été employé pour transmettre à distance et distribuer la puissance motrice. Dans certains cas, on a trouvé avantage à s'adresser à l'air raréfié. Nous avons déjà eu l'occasion d'entrer dans quelques considérations sur ce mode de distribution : par sa nature même, il ne saurait se prêter au service d'un réseau important ou étendu; au point de vue de la transmission du travail, quel que soit le fluide qui serve d'intermédiaire, liquide, gaz ou électricité, pour porter loin, il faut de fortes tensions. Toutefois, lorsqu'il s'agit de desservir une distribution qui ne comporte ni de grandes surfaces, ni des récepteurs bien puissants, l'air raréfié peut présenter des commodités d'emploi particulières.

A titre d'exemple intéressant, nous citerons l'application faite, dans un des quartiers

de Paris, par la Société anonyme de distribution de force à domicile, sous la direction de M. Boudenoot.

L'usine génératrice est installée rue Beaubourg. La situation est bien choisie pour une entreprise de cette nature, car la rue Beaubourg est le centre d'une population très dense, comportant un grand nombre de petits ateliers; le quartier est, pour ainsi dire, une agglomération de cités industrielles, dans lesquelles se fabrique principalement ce qu'on appelle *l'article de Paris.*

Cette usine comprend comme outillage :

Un générateur semi-tubulaire, de 140 mètres carrés de surface de chauffe, avec cheminée et accessoires;

Une machine à vapeur horizontale, du système Corliss, construite par la maison Brasseur, de Lille, et d'une puissance d'environ 70 chevaux;

Une pompe à air, montée en tandem dans le prolongement du cylindre à vapeur; le cylindre a 1 m. 090 de diamètre pour une course de 1 m. 070; la vitesse, commandée par un régulateur spécial, varie de 30 à 50 tours par minute, suivant le degré du vide à l'aspiration. Le refroidissement est donné par de l'eau injectée, sous forme de jets très divisés, par une pompe foulante; les garnitures du piston sont en caoutchouc durci et les clapets en caoutchouc souple.

Le système employé pour régler l'allure de la machine est intéressant. La vitesse doit varier suivant les besoins du service; elle doit croître quand le vide tend à baisser, et réciproquement. C'est un régulateur à force centrifuge qui domine la détente; ce régulateur est à surcharge, mais une partie de la charge supplémentaire est équilibrée par un piston, qui est en relation avec la conduite d'air raréfié. Quand le vide augmente, son action, s'ajoutant à celle de la force centrifuge, tend à diminuer l'admission de vapeur et, par conséquent, à réduire la vitesse. Le vide produit par l'usine centrale est distribué à l'aide d'une canalisation principale de quelques centaines de mètres de développement, constituée par des tuyaux de fonte de 0 m. 250 à 0 m. 100 de diamètre; sur cette canalisation viennent se brancher les conduites montantes, qui desservent les immeubles privés et qui sont en tuyaux de plomb.

Les récepteurs sont de petites machines assez semblables aux machines à vapeur; ils sont de deux types : rotatif pour les petites forces et à fourreau à partir de 1/3 de cheval; on ne fait guère usage de moteurs de plus de 1 cheval.

Le travail est payé par les abonnés d'après le nombre de tours constaté par un compteur. La Société fournit en location le récepteur; elle établit à ses frais les colonnes montantes desservant plusieurs abonnés dans un même immeuble.

Cette installation modeste, mais intéressante, rend les plus sérieux services aux nombreuses et actives industries qui se pressent aux alentours de l'usine.

Nous arrivons aux ventilateurs. Ceux de ces appareils qui figuraient dans les galeries de l'Exposition étaient, pour la plupart, destinés à un service spécial, tel que la ven-

tilation des édifices ou des mines, le vannage des grains, le soufflage des forges, des cubilots, des chaudières de torpilleurs, etc. Pour ce motif, ils échappaient à l'examen du jury de la classe 52. Aussi notre étude ne s'étendra-t-elle qu'à un nombre assez restreint de ventilateurs.

On comprend sous le nom de *ventilateurs* les appareils ayant pour objet de débiter de grandes quantités d'air sous une pression fort peu supérieure à la pression atmosphérique; la compression qu'ils produisent se mesure tout au plus par quelques décimètres d'eau. Même dans ces limites, il convient de distinguer ceux qui engendrent une pression plus élevée de ceux qui produisent une pression plus basse. Le plus souvent, les premiers agissent à la façon des pompes à piston, c'est-à-dire par déplacement, à l'aide d'une capacité à volume variable; on les appelle souvent *volumogènes*. Les ventilateurs de la seconde catégorie sont fondés sur les mêmes principes que les turbines et les pompes centrifuges; ils utilisent l'inertie du fluide à déplacer.

Malgré l'analogie du mode de fonctionnement, les ventilateurs volumogènes s'écartent beaucoup, comme dispositions, des pompes à piston, les conditions à satisfaire étant absolument différentes.

Pour débiter de grands volumes, il faut des organes animés de vitesses considérables; comme, d'autre part, les pressions à produire sont toujours très petites, on n'a pas à se préoccuper outre mesure du défaut d'étanchéité. C'est au type rotatif que l'on a le plus souvent recours. Il comporte d'ailleurs un grand nombre de variétés, soit à un axe, soit à deux ou plusieurs axes.

Le ventilateur établi par la maison Skinner et Cie, de Londres, et exposé par le Patent pump and blower Syndicate, est tout à fait semblable, comme dispositions et comme fonctionnement, à la pompe rotative des mêmes constructeurs, que nous avons précédemment décrite.

Dans un cylindre à fonds plats tourne, autour d'un axe excentré, un second cylindre, qui porte deux ou trois palettes, formant joint sur leurs bords; le volume compris entre deux palettes et les cylindres varie; ce sont ces variations de volume qui produisent le mouvement du fluide. Le principe n'est pas nouveau d'ailleurs et a reçu d'anciennes et nombreuses applications.

Dans l'exposition de la maison Biétrix, de Saint-Étienne, dont nous avons eu plus d'une fois à parler, on voyait un curieux ventilateur, fondé sur un principe qui paraît nouveau; le schéma ci-contre (fig. 235) donnera une idée de cet ingénieux appareil, inventé par *M. Mortier*. La partie mobile est constituée par cinq palettes *AA*, en forme de fuseau, qui, tout en restant constamment parallèles à une direction fixe, sont emportées par le mouvement circulaire de la couronne *BB*, sur laquelle elles sont embrochées par leurs axes *CC*. La couronne *BB* tourne autour de l'arbre central *D*. L'appareil est enfermé dans une cuve fixe, composée d'une partie extérieure *EEE* et d'un noyau *FF*;

les profils de la cuve sont tracés de manière à être effleurés par les parois des palettes. Des obturateurs triangulaires *GG*, solidaires de la couronne *BB*, complètent la fermeture; quant au parallélisme des palettes, il est assuré par une contre-couronne *HH*,

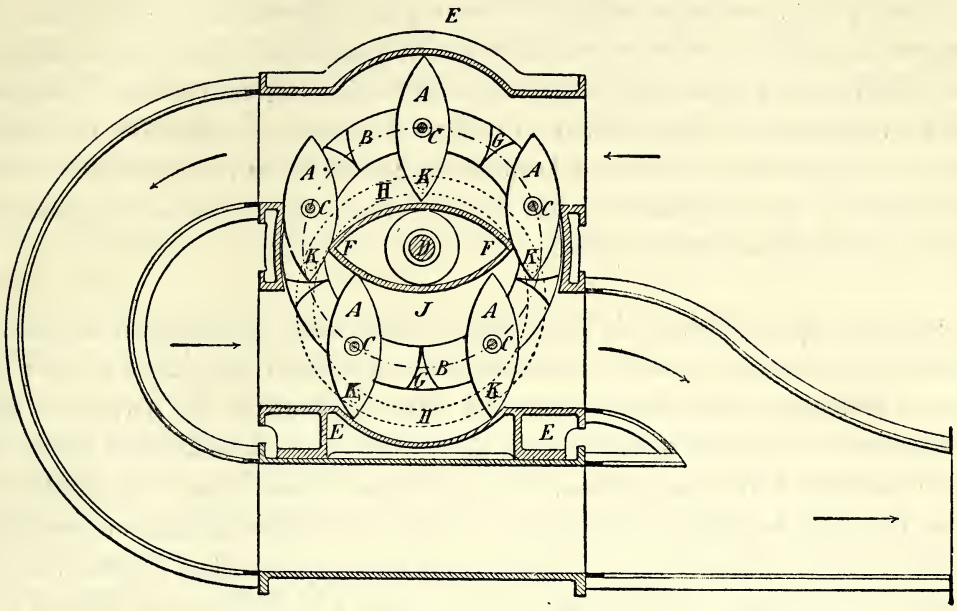


Fig. 235. — Ventilateur Mortier.

de diamètre égal à celui de *BB*, et tournant autour du centre *J*; sur cette contre-couronne, les palettes sont articulées à l'aide de goujons *KK* montés à une distance des broches *C* égale à la distance des centres *D* et *J*; les figures telles que *DJKC* sont ainsi des parallélogrammes, et *DJ* reste parallèle à *KC*.

Il est facile de se rendre compte du jeu de cet appareil : on voit qu'à chaque demi-révolution, il déplace un volume d'air équivalent à celui d'un cylindre qui aurait pour hauteur le diamètre du cercle décrit par les broches *CC* et pour base l'aire de l'une des palettes. Eu égard à son encombrement, ce ventilateur offre un débit considérable, et c'est là un avantage des plus précieux dans nombre d'applications.

Si la théorie des pompes centrifuges laisse encore à désirer sur plus d'un point, celle des ventilateurs centrifuges est bien plus incomplète encore. Des recherches considérables et intéressantes ont été accomplies dans ces derniers temps, mais il règne encore, en cette matière, beaucoup d'obscurité et d'incertitude. Les vérifications expérimentales sont en effet des plus difficiles. Lorsqu'il s'agit de jauger un liquide, l'opération peut se faire en général avec une exactitude suffisante; avec l'air, il est loin d'en être de même, surtout lorsqu'on a affaire à des débits énormes, comme ceux des ventilateurs; on est obligé de recourir à des mesures de vitesse, qui ne présentent,

avec les instruments en usage, qu'une grossière approximation et des garanties douteuses.

Les appareils que nous étudions sont généralement constitués par une roue à aubes courbes, enfermée dans une caisse cylindrique; la roue tourne à grande vitesse; elle reçoit l'air par son centre ou œillard, et l'évacue par sa circonférence; le ventilateur est aspirant ou soufflant, suivant que la différence de pression se traduit par une dépression à l'œillard ou par une surpression à la circonférence. Suivant les effets à produire et les circonstances de l'installation, on s'efforce de donner à la machine les dimensions, les dispositions, les formes et la vitesse qui paraissent les plus convenables; mais ces recherches, que ne guident ni une théorie certaine, ni un contrôle expérimental précis, restent vagues et incertaines.

Lorsqu'il s'agit de déplacer de très grands volumes d'air, sans variation sensible de pression, on a souvent recours à des ventilateurs qui agissent, non plus à la façon des pompes centrifuges, mais plutôt comme les hélices propulsives des navires; la roue mobile porte des palettes inclinées, et la masse d'air mise en mouvement prend une vitesse parallèle à l'axe de rotation. Ces ventilateurs débitent par l'aire entière du cercle décrit par les palettes; ils sont peu encombrants et d'une installation commode.

MM. Geneste, Herscher et Cie, de Paris, ont beaucoup contribué à généraliser les emplois de ce système, et ils l'ont appliqué largement à la ventilation des édifices. Leur exposition comportait un certain nombre de ces appareils, bien conçus et habilement étudiés. Ces petites roues, tournant à grande vitesse et absorbant peu de puissance, peuvent s'atteler directement sur l'arbre d'une dynamo, et la souplesse du conducteur électrique se prête merveilleusement aux exigences des localités à ventiler, souvent fort éloignées ou encombrées. MM. Geneste et Herscher n'ont eu garde de négliger ces facilités nouvelles données à l'emploi de la ventilation mécanique, et ils ont appliqué ces combinaisons de la façon la plus heureuse dans plusieurs édifices importants.

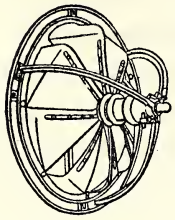


Fig. 236. Ventilateur Blackmann.

La figure 236 représente un ventilateur pour construction civile. Le dessin est tiré des publications de la Blackmann air Propeller ventilating Company, de Londres; il s'explique de lui-même.

La Société anonyme Électricité et Hydraulique, de Charleroi (Belgique), expose de petits ventilateurs actionnés par des turbines, le tout formant un ensemble compact et léger, qui peut être installé dans n'importe quelle position et recevoir le mouvement de l'eau empruntée à une distribution urbaine.

Dans certains cas, pour produire un courant d'air énergique, on fait usage d'un jet de vapeur ou d'air comprimé, qui communique son mouvement, par entraînement

latéral, à la masse de fluide environnante. Ce procédé n'est autre que celui employé sur les locomotives, pour activer le tirage à l'aide de la vapeur d'échappement lancée dans la cheminée à sa sortie des cylindres. Il a été mis en faveur par l'application qui en a été faite, en 1867, pour la ventilation des galeries de l'Exposition universelle; c'est à *M. Demondésir* qu'est due cette vaste et intéressante expérience. Depuis lors, le système a été étendu à un grand nombre de cas. MM. Geneste, Herscher et Cie en ont fait largement usage. Beaucoup de souffleries fonctionnent d'après ce principe. M. Vabe, ingénieur à Paris, présente un petit appareil, dit *souffleur,* qui n'est qu'une application de la ventilation par entraînement latéral.

Nous terminerons le présent chapitre par quelques courtes indications sur les *moulins à vent.*

Ces machines empruntent leur puissance aux courants d'air qui parcourent l'atmosphère. Ces courants sont loin de présenter la même allure dans les différents pays. Dans quelques contrées de l'Amérique, ils ont un régime passablement régulier; il se passe peu de journées sans que le vent se fasse sentir avec assez d'intensité pour agir efficacement sur un moteur; l'usage des moulins à vent s'y est répandu, et l'on en construit de fort grands, qui donnent quelques dizaines de chevaux de puissance par une brise moyenne.

Dans nos pays, il n'en est pas ainsi; le régime des vents est très capricieux et irrégulier. Il se présente fréquemment, surtout en été, des périodes de calme d'une durée de plusieurs semaines, pendant lesquelles le moteur est condamné au repos; ce sont là des conditions extrêmement fâcheuses pour l'industrie. Autrefois, les moulins à vent étaient surtout employés pour actionner les meules à moudre le blé; pour cet usage, ils ont, depuis longtemps, cédé la place à des moteurs plus réguliers et plus dociles, tels que les moteurs hydrauliques ou à vapeur. On a cherché ensuite à les appliquer à l'élévation des eaux; c'est un service auquel ces machines semblent mieux appropriées; les pompes élévatoires s'accommodent facilement à des allures variables, tantôt lentes, tantôt rapides; de plus, et c'est là le point important, on peut, sans trop de frais, établir des réservoirs, dans lesquels l'eau s'emmagasine quand le vent est favorable, pour être dépensée pendant les périodes de calme.

En Hollande, on se sert encore de moulins à vent pour assécher les vastes plaines basses et sans écoulement naturel; l'époque des pluies étant généralement aussi celle des vents, cette coïncidence est favorable au fonctionnement des moteurs atmosphériques.

En France, c'est aux irrigations qu'on s'est efforcé d'appliquer les moulins à vent. Mais ici, les conditions sont beaucoup moins bonnes : quand il pleut, on n'a pas besoin d'irriguer; et lorsqu'il fait beau, lorsqu'il serait utile d'avoir de l'eau, il n'y a pas de vent et le moteur reste immobile. Il faudrait des réservoirs démesurés pour approvisionner à l'avance toute l'eau qui doit être dépensée pendant les longues périodes de

calme et de chaleur, si fréquentes dans nos climats. D'ordinaire, il est bien plus économique de recourir, soit à un manège à cheval, soit à une machine à vapeur. C'est beaucoup moins cher d'installation, et on a l'eau quand on en a besoin.

Il ne faut donc pas s'étonner outre mesure si, dans nos climats, ces machines, si intéressantes au point de vue mécanique, tendent peu à peu à disparaître. On fait encore des moulins à vent; mais beaucoup de ceux qui existent sont abandonnés et, faute d'entretien, tombent en ruines. Le moulin à vent est devenu, dans bien des cas, un objet de luxe; ses formes élancées, ses mouvements élégants, ses couleurs éclatantes signalent de loin un château ou une belle propriété d'agrément. Le parc des moulins à vent était l'une des parties les plus pittoresques et les plus animées des berges de la Seine pendant l'Exposition de 1889.

L'ancien moulin à vent, avec ses quatre ailes tendues de toile, son chapeau mobile, sa manœuvre pénible, telle que nous l'avaient légué les siècles précédents, est abandonné dans notre pays. S'inspirant plus ou moins des modèles américains, la plupart de nos constructeurs établissent leurs roues sous forme d'éventails, avec des lames étroites et longues, en métal ou en bois. Des dispositifs variés, quelques-uns fort ingénieux, servent à modérer la vitesse quand le vent devient trop fort, et à effacer les aubes au moment des tempêtes. Des mécanismes adroitement agencés assurent l'orientation automatique de l'appareil. Le moulin est souvent établi au sommet d'une tour en fer élégante et légère, de manière à recueillir les hautes brises, toujours plus fraîches que celles qui règnent à la surface du sol.

Quant à ces appareils, si souvent proposés, toujours abandonnés, qu'on a désignés sous les noms de *panémores*, de *panémones*, de *pananémones*, ils semblent avoir définitivement disparu. Ils consistent, comme on sait, en un système de surfaces planes, pivotant sur une armature, laquelle tourne elle-même autour d'un axe vertical; les choses sont disposées de telle sorte, que les sufaces présentent au vent leur plein lorsqu'elles sont d'un côté de l'axe, et leur tranche lorsqu'elles sont du côté opposé; il en résulte un moment, qui fait tourner l'appareil. Le principal avantage poursuivi par les inventeurs de ces systèmes, c'est la suppression de l'orientation, la machine recevant son mouvement quelle que soit la direction du vent. Mais cet avantage est payé bien cher : comme une partie seulement des surfaces est active, l'appareil est lourd, encombrant, coûteux; il consomme en frottements la meilleure partie du travail qu'il reçoit, et dépense beaucoup d'huile et d'entretien.

CHAPITRE VIII.

TRANSMISSION DU TRAVAIL.

SECTION I.

COURROIES ET SYSTÈMES FUNICULAIRES.

SOMMAIRE.

Généralités. — Transmissions par courroies. — Transmissions courantes. — Vitesses en usage. — Glissements. — Transmissions principales.

Construction des courroies. — Courroies en cuir de Domange et autres fabricants. — Courroies articulées d'Angus, de Roullier et Mesnard, de l'American Company. — Courroies en tissu de Lechat et autres. — Cordes à boyau. — *Transmissions par câbles* de Vertongen et Harmignies.

Poulies en fer de Brancher, de Ludwig et Shopfer. — Poulies en bois de Dodge.

Les transmissions funiculaires jouent un rôle de première importance dans tous les ateliers où des machines-outils sont actionnées par une puissance mécanique. Un arbre horizontal, qui règne dans toute la longueur de l'atelier, repose sur des chaises, par l'intermédiaire de coussinets; il est animé d'un mouvement de rotation continu, emprunté au moteur central; il porte des poulies, en nombre parfois considérable; sur chacune de ces poulies est jetée la corde, la courroie, le lien flexible, qui actionne la poulie parallèle, montée sur l'outil à mouvoir.

Ce mode de transmission est pratiqué d'une manière absolument générale; il a été employé aux époques les plus reculées; il est appliqué dans les circonstances les plus variées; il donne le mouvement à la meule du gagne-petit, à l'aiguille de la machine à coudre, aussi bien qu'aux centaines de métiers des plus grandes filatures et aux puissantes machines qui scient les barres de fer ou taillent les plaques de blindage.

Le système présente au plus haut degré les caractères de simplicité, de rusticité, de bon marché, de facile entretien, que réclament les opérations industrielles. Sa technique, établie par des exemples séculaires, n'a pas beaucoup varié comme dispositions d'ensemble; mais le progrès n'a cessé de se faire d'une manière continue, et, dans ces dernières années, il s'est très sensiblement accentué. Il convient de jeter un coup d'œil sur ces améliorations. Il faut distinguer les transmissions courantes des transmissions principales.

Dans les ateliers bien installés, les transmissions par arbres et courroies sont établies aujourd'hui avec des soins particuliers. Les arbres, bien dressés, bien tournés, sont

portés sur des paliers solidement établis, par l'intermédiaire de coussinets rigoureusement ajustés. Le graissage est fait avec abondance; les lubrifiants, amenés par des dispositifs automatiques, sont approvisionnés dans des réservoirs appropriés, de telle sorte que la provision puisse suffire longtemps, sans avoir besoin d'être fréquemment renouvelée. Les poulies, exactement tournées et centrées, sont d'ordinaire en deux pièces, ce qui permet de les déplacer et de les remplacer facilement; cette opération est encore rendue plus aisée par des méplats pratiqués sur l'arbre; ces poulies, calculées avec précision dans tous leurs éléments, sont le plus souvent en fonte; depuis quelques années, on les fait aussi en fer forgé, et même en bois, et par conséquent fort légères. Les courroies, bien normales aux axes sur lesquels elles roulent, reçoivent la tension nécessaire pour qu'elles ne glissent pas, mais sans dépasser la mesure voulue. Les assemblages des bouts de courroies sont établis de manière à ne pas affamer la matière et à maintenir la surface roulante aussi unie que possible.

Toutes ces précautions sont indispensables; à leur défaut, la transmission absorberait la plus grande partie de la puissance motrice, et il n'en arriverait qu'une faible fraction aux outils à mettre en mouvement; c'est là un état de choses ruineux, que malheureusement on rencontre encore bien souvent et qui témoigne du plus fâcheux laisser aller.

Pour garantir la sécurité des ouvriers, on a recours à des dispositifs spéciaux, qui permettent de monter la courroie sur sa poulie et de la descendre, sans se servir d'échelles, sans toucher aux arbres ni avoir à suspendre la marche du moteur.

Une des caractéristiques du progrès accompli, c'est la vitesse de plus en plus grande qu'on donne aux courroies et aux arbres de transmission. La puissance transmise dépend de deux facteurs : la vitesse de rotation et le moment moteur, lequel est lui-même proportionnel à la tension de la courroie. En augmentant la vitesse, on peut réduire la tension, c'est-à-dire la charge imposée à l'arbre, et, par suite, tous les frottements. D'une Exposition à l'autre, la vitesse de la transmission générale n'a cessé d'aller en croissant : elle était de 100 tours par minute en 1867, de 120 tours en 1878; elle a été portée à 150 tours en 1889. Mais dans les ateliers particuliers, et surtout en Amérique, on imprime souvent aux arbres de couche des vitesses beaucoup plus considérables.

Si bien établie que soit une transmission funiculaire, on ne peut espérer obtenir une concordance absolue entre les vitesses des deux arbres qu'elle relie; abstraction faite des patinements accidentels, qui ont lieu lorsque la courroie est trop lâche ou mal calculée, il résulte forcément, du mode même de fonctionnement, un glissement relatif, qui ne saurait être négligé; en passant du brin mou au brin tendu, le lien flexible subit une tension progressivement croissante, laquelle se traduit nécessairement, en vertu de l'élasticité de la matière, par un allongement; la jante de la poulie étant de longueur invariable, il se produit forcément un glissement entre les deux surfaces en

contact; de là une discordance entre les vitesses angulaires des deux arbres. Cette discordance est elle-même variable et dépend d'un grand nombre d'éléments, parmi lesquels entre en première ligne l'allongement élastique que peut prendre la courroie sous une charge donnée. A ce point de vue, il y aurait tout intérêt à ce que les courroies fussent aussi peu extensibles que possible. Mais, d'autre part, on ne doit pas oublier qu'un des grands avantages des transmissions que nous examinons, c'est leur souplesse à s'accommoder à de petites variations dans la distance des axes, et cet avantage précieux disparaîtrait complètement si le lien devenait inextensible.

Quoi qu'il en soit, la transmission funiculaire cesse de s'appliquer lorsqu'il est nécessaire que les vitesses des arbres conjugués soient toujours dans un rapport constant.

Les questions que nous venons d'effleurer se posent d'une manière impérieuse, lorsqu'il s'agit de transmettre, non plus le travail dont on a besoin pour mettre en mouvement les machines-outils ordinaires, mais, comme on le fait aujourd'hui, les puissances développées par les grands moteurs usités dans l'industrie moderne. En pareil cas, la construction du lien flexible et des poulies sur lesquelles il s'enroule devient œuvre d'art et de précision, au même degré que l'établissement du moteur lui-même. Il est intéressant de se rendre compte de l'état actuel de cette question.

Pendant fort longtemps, la transmission par courroies n'a été employée que pour les petites puissances; la courroie était simple, grossièrement préparée et marchait à faible vitesse. Peu à peu, grâce aux progrès accomplis, on a pu demander plus de travail à la courroie. L'Exposition de 1878 a marqué une étape importante dans cette voie : on y remarquait notamment la grande et forte courroie qui reliait l'arbre de couche de la section anglaise au volant de la machine de Galloway, et était établie pour desservir une puissance de 300 chevaux.

Aujourd'hui, on n'hésite pas à se servir de courroies pour transmettre des puissances beaucoup plus élevées encore, c'est-à-dire dans nombre de cas où l'on se fût cru obligé, il n'y a pas bien longtemps, de recourir à des engrenages. Sur ce point, comme sur beaucoup d'autres, les développements qu'ont pris les applications de l'électricité ont eu une influence décisive. En effet, pour la conduite des dynamos, la transmission funiculaire présente des avantages inappréciables. Non seulement elle est simple, robuste, peu coûteuse d'installation et d'entretien, facile à démonter et à remettre en place, mais encore, lorsqu'elle est convenablement installée, elle absorbe peu de travail en résistances passives, et elle fonctionne sans chocs et sans bruit. Elle est d'ailleurs employée d'une façon générale aujourd'hui pour conduire les mécanismes à allures rapides.

On réserve, au contraire, les engrenages pour les cas où l'on a à produire de grands efforts sous des vitesses modérées.

Donnons quelques indications sur la construction des courroies, telle qu'on l'établit aujourd'hui.

IMPRIMERIE NATIONALE.

La courroie roulant sur fonte est encore la plus en usage. Pour les transmissions puissantes, la courroie comporte toujours plusieurs épaisseurs. Les lanières élémentaires, après avoir subi les préparations chimiques qui constituent le tannage, sont fortement étirées, de manière que leur allongement ultérieur soit aussi faible que possible; puis elles sont appliquées les unes sur les autres et assemblées au moyen de rivets ou de coutures, plus souvent encore par collage à l'aide de colles spéciales. Parfois les lanières, découpées en bandes étroites, sont assemblées sur champ à côté les unes des autres.

Pour fermer le circuit et réunir les deux bouts flottants, on se sert encore d'agrafes et de rivets de diverses formes; mais ces procédés, très usités lorsqu'il s'agit de petites courroies, dont il faut, suivant les besoins, modifier fréquemment la longueur, sont abandonnés pour les courroies maîtresses; celles-ci sont cousues ou collées. Souvent elles sont livrées fermées, toutes prêtes à servir et à la longueur voulue, par le fabricant de courroies; les petits allongements se rattrapent par le déplacement des paliers de l'arbre commandé.

On fait aussi des courroies en tissus divers imprégnés de caoutchouc ou d'autres matières. C'est un sujet sur lequel nous aurons à revenir.

Parmi les expositions de courroies en cuir qui ont attiré l'attention du jury, il convient de citer en première ligne la maison A. Domange, successeur de Scellos, de Paris. Les magnifiques produits présentés par M. Domange ont, à juste titre, excité l'admiration de tous les visiteurs. Cette maison avait fourni la plupart des courroies qui servaient à activer les différentes stations électriques, Gramme, Edison, *Davey-Paxman,* etc.

Citons également les expositions des maisons Poullain frères, de Paris; Ve Placide-Peltereau (le jeune frère), de Château-Renault; Magnin (Jérôme), de Lyon; Huguet, de Paris. Dans les expositions étrangères, nous trouvons la Underwood Manufacturing Company, de Tolland, Conn. (États-Unis), qui expose également de fort belles courroies en coton, MM. Fétu, Defize et Cie, de Liège, etc.

La maison G. Angus and Co, de Newcastle, à côté de magnifiques courroies en cuir et en coton, traitées dans le style ordinaire, expose des courroies en cuir, en

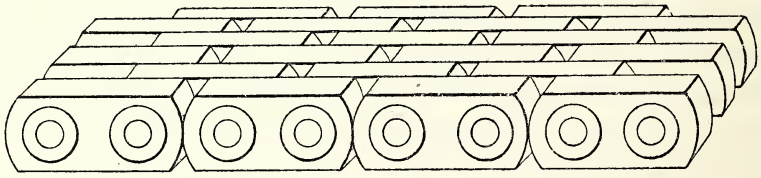


Fig. 237. — Courroie Angus.

forme de chaîne de Gall, et dont la figure 237 montre un spécimen; ces sortes de chaînettes donnent un roulement très doux; elles présentent l'avantage de pouvoir

se raccourcir à volonté, sans nécessiter ni collage ni couture; enfin elles peuvent être livrées à bas prix, car il n'entre dans leur confection que de petits morceaux provenant des débris des autres fabrications.

Des documents remis au jury, il semble résulter que ce système de courroies a été inauguré, en 1862, par la maison Roullier fils et L. Mesnard, de Paris, qui en font l'objet d'une fabrication spéciale et qui en avaient exposé de beaux spécimens.

Le même genre de courroies était exposé par l'American link belt C°, de New-York.

A côté des courroies en cuir, qui demeurent encore les plus en usage, il convient de citer les courroies en tissu, qui commencent à prendre de l'importance dans l'industrie. Lorsqu'elles sont bien établies, ces courroies sont très résistantes, bien adhérentes, peu extensibles et fort durables. Le tissu est d'ordinaire imprégné, soit de caoutchouc, soit de divers enduits, destinés à le protéger contre la chaleur et les buées et à augmenter l'adhérence sur les jantes des poulies. L'une des plus belles expositions de ce genre de produits était celle des courroies en coton présentées par M. J. Lechat, de Gand; en dehors de l'emplacement spécialement réservé à cette maison, plusieurs de ces courroies, pouvant au besoin transmettre des centaines de chevaux-vapeur, étaient montées sur diverses machines motrices en mouvement; l'exposition de la maison Joseph Farcot en utilisait des spécimens.

Mentionnons encore, dans le même genre de produits, les expositions de la Gandy belt Manufacturing C°, de Londres; de MM. Paraf frères, de Paris; de Martiny-Verstraet, de Saint-Denis; de Reed (J. van), de New-York, etc.

Certains manufacturiers font entrer, dans la fabrication des courroies, d'autres textiles que le coton. La Manufacture générale de courroies de transmission, ancienne maison Versé Spelmans, Ant. Brichot et Cie, de Bruxelles, expose des courroies fort belles, faites en crins; l'une de ces courroies a une largeur de 1 m. 68 et peut transmettre une puissance de 1,000 chevaux.

La maison Reddaway et Cie, qui a ses usines à Pendleton, près Manchester, fabriuqe sur une grande échelle des courroies en poils de chameau, auxquelles elle attribue une résistance très grande.

MM. Emerson et Midgley, de Beaver Falls, Pa. (États-Unis), constituent leurs courroies en fils d'acier tissés. L'une de ces courroies, de 0 m. 50 de largeur, faite en fils de 1 millim. 6, pesant 6 kilogrammes au mètre courant, transmettait la puissance d'environ 100 chevaux développée par la machine Straight Line. La solution est intéressante et mérite d'être notée.

Il ne sera pas hors de propos, à la suite des courroies, de dire un mot des cordes à boyau, ces modestes organes, qui rendent des services signalés à de nombreuses

industries petites ou grandes, et font l'objet d'une fabrication qui n'est pas sans importance. Elles étaient exposées par plusieurs maisons : Veuve E. Collet, de Paris; Jager (Georges), de Montpellier, etc.

Pour la transmission de puissances un peu considérables, on fait usage d'un procédé qui était anciennement connu, mais qui n'avait reçu que d'assez rares applications; il s'est, au contraire, beaucoup développé depuis quelques années. Les jantes des poulies conjuguées sont, non pas lisses, mais pourvues de gorges profondes, parallèles entre elles et plus ou moins nombreuses. Dans ces gorges se placent des câbles sans fin, qui vont d'une poulie à l'autre. Les gorges présentent un profil angulaire, dans lequel le câble se coince légèrement, ce qui assure une grande adhérence. Ces câbles de transmission fonctionnent bien, même sous une tension très faible; les glissements résultant des allongements sont moins à craindre qu'avec les courroies. Les transmissions de ce genre sont très souples et se prêtent facilement à des changements de direction. Le système est encore trop récent pour que les avantages qu'on lui attribue aient pu s'affirmer bien nettement dans la pratique. On lui reproche de nécessiter, pour le montage de chaque câble, la confection d'une épissure, opération assez délicate et qui ne peut être bien faite que par des ouvriers spéciaux. Les câbles se font ordinairement en chanvre; quelquefois aussi on fait usage de câbles en coton, qui sont plus souples et s'enroulent sur de plus petits diamètres.

La maison Vertongen et Harmignies, d'Auby, près Douai (Nord), avait une fort belle exposition de câbles de transmission en chanvre de Manille. Elle avait fourni les câbles qui communiquaient à l'arbre de couche, dans le Palais des machines, le mouvement pris sur les grandes machines de Sulzer frères, de Carels frères, de la Société du Phénix, etc.

Nous terminerons cette section par quelques indications sur certains dispositifs intéressants ou originaux, récemment mis en usage dans l'établissement des poulies de transmission.

Nous avons déjà eu l'occasion de parler des poulies en fer ou en acier; elles sont de plus en plus en faveur. Le grand avantage qu'elles présentent, c'est leur légèreté. Il semble, d'autre part, que le coefficient de frottement du cuir sur le fer soit plus élevé que dans le cas de la fonte, ce qui permettrait de diminuer la tension des courroies.

La brassure de ces poulies se fait d'ordinaire en fers plats, pris par un bout dans un moyeu en fonte et rivés à leur autre extrémité sur la jante, laquelle est en tôle. La construction est simple et rentre dans la catégorie des ouvrages courants de grosse serrurerie; une poulie en fer bien établie tourne bien rond et sans dévers; on peut lui donner sans danger de grandes vitesses. Quelquefois, pour augmenter l'adhérence, on pratique sur la jante un grand nombre de trous, par lesquels s'échappe l'air emprisonné par la courroie.

M. Brancher (A.), de Paris, présentait des poulies du genre que nous venons de décrire.

Dans le même ordre d'idées, on peut citer les poulies en tôle fabriquées par MM. Ludwig et Shopfer, de Berne. La figure 238 représente une de ces poulies. La brassure est

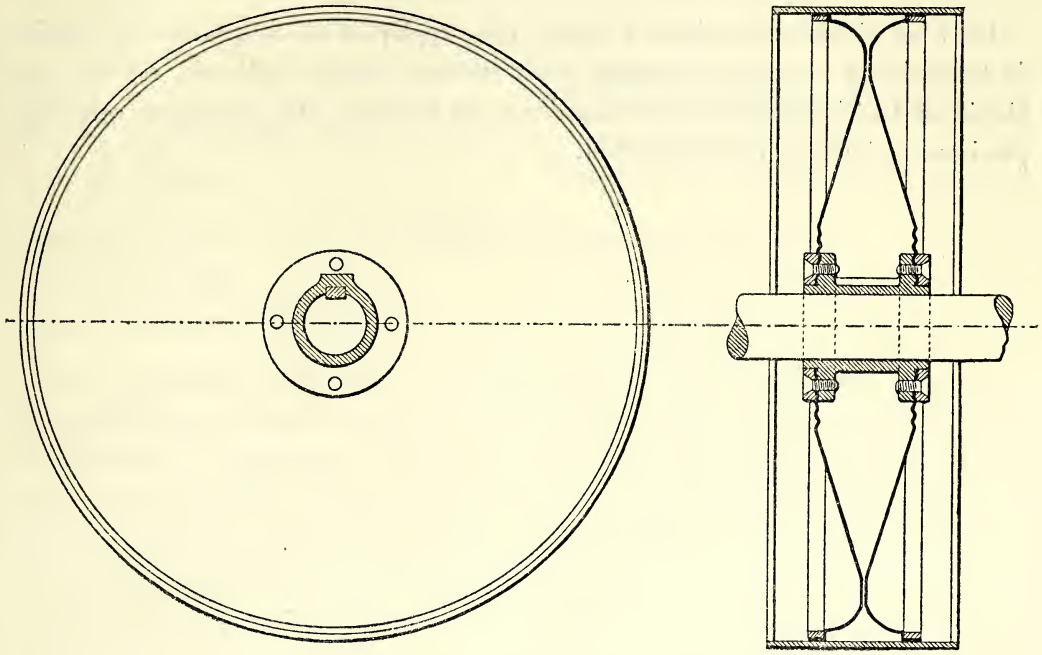


Fig. 238. — Poulie en fer Ludwig et Shopfer.

remplacée par deux tôles embouties en forme de cônes; l'assemblage sur le moyeu en fonte s'obtient par le serrage de deux couronnes sur une partie plissée; l'assemblage sur la jante se fait par deux cercles rivés. L'ensemble est rigide et cependant suffisamment élastique, grâce à la courbure des tôles embouties et à quelques ondulations ménagées dans le voisinage du moyeu. Aux grandes vitesses, ce dispositif réduit notablement la résistance de l'air. Ces poulies se font également en deux pièces. Les spécimens exposés étaient remarquables par la beauté de l'exécution.

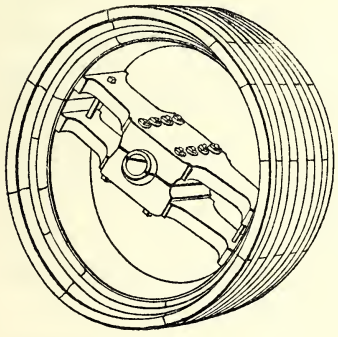


Fig. 239. — Poulie en bois de Dodge.

La Dodge Manufacturing C°, de Mishawaka, Indiana (États-Unis), expose des poulies en bois, dont la figure 239 représente un modèle. Ces poulies, très soignées comme exécution et d'un fort bel aspect, sont fabriquées sur une large échelle et expédiées dans le monde entier. On commence à en faire usage dans l'industrie française. La jante est formée de cou-

ronnes étroites en peuplier, fortement collées et clouées; après assemblage, elle est sciée suivant un plan diamétral. La brassure, enlevée à la scie à ruban, s'assemble à queue d'aronde dans la jante. La portée sur l'arbre se fait par une fourrure en bois dur, sur laquelle vient serrer le moyeu. Un vernis fin et solide enveloppe toutes les surfaces. L'ensemble est léger, rigide et paraît peu exposé à se déformer.

On a fait récemment quelques tentatives pour appliquer à la fabrication des poulies de transmission le papier comprimé; cette matière, comme on le sait, est fort employée en Amérique pour la confection des roues de wagon. Les essais dans cette voie paraissent présenter un certain intérêt.

SECTION II.

ENGRENAGES, EMBRAYAGES, DÉCLICS.

SOMMAIRE.

Division.
Engrenages. — Considérations générales. — Engrenages de Piat.
Accouplement de Raffard.
Embrayages. — Embrayages de Mégy, Echeverria et Bazan, de Mason, de Deliège, de Brancher, de Gustin, de Farcot, de Snyers.
Observations sur les embrayages.

Dans la présente section, nous examinerons successivement :

Les engrenages;

Les embrayages et déclics.

Les transmissions funiculaires et les engrenages sont les deux procédés les plus généralement employés pour transmettre d'un arbre à un autre un mouvement continu de rotation. Les engrenages s'imposent, à l'exclusion des courroies, toutes les fois que la vitesse de l'arbre conduit doit rester dans un rapport absolument constant avec la vitesse de l'arbre conducteur; en outre, on les emploie de préférence dans les cas où les efforts à transmettre sont considérables.

De nombreux et savants géomètres se sont livrés à l'étude des engrenages. Les résultats de ces longues recherches ont fourni des tracés simples, qui sont appliqués d'une manière courante dans les ateliers. Dans un système de roues traitées suivant ces méthodes, les vitesses angulaires des deux roues doivent rester dans un rapport rigoureusement constant; chaque dent de la roue motrice doit venir successivement en contact avec la dent correspondante de la roue menée, et s'appuyer sur elle doucement et sans choc; pendant toute la durée du contact, l'effort exercé entre les deux surfaces ne doit pas varier; enfin, au moment où les dents se séparent, la composante normale de la vitesse relative au contact doit être nulle, comme au moment de l'entrée en prise.

Tels sont les effets auxquels devrait conduire l'application exacte des données théoriques; les engrenages ainsi constitués rouleraient sans bruit, sans choc, sans vibrations, et ne donneraient lieu qu'à des frottements et à une usure minimes.

Dans la pratique, il est bien rare qu'il en soit ainsi : le plus souvent les trains d'engrenages, pour peu qu'ils tournent un peu vite, sont bruyants; ils vibrent, ils donnent des chocs; parfois ils sont durs au frottement, grippent, s'usent vite et consomment beaucoup de graisse, ou même donnent lieu à des arc-boutements et à des ruptures. Le bruit est, dans certains cas, si intense, qu'il devient intolérable, non seulement dans l'atelier, mais aussi pour le voisinage.

Ces manifestations variées sont évidemment la traduction d'imperfections plus ou moins graves, soit dans la construction, soit dans le montage. Lorsqu'un mécanisme est constitué par des organes souples et déformables, ces légères imperfections se corrigent d'elles-mêmes. Mais dans un engrenage, tout est rigide, les bras, les jantes, les dents, et cette rigidité ne peut qu'exalter l'intensité des chocs.

Pour pallier ces défauts, on a recours à plusieurs artifices. On fait assez souvent la denture en bois dur; la légère compressibilité du bois amortit le choc à l'entrée en prise. Pour les petits engrenages, on atténue le bruit en attachant à la brasure des masses de plomb, qui absorbent les vibrations. Certains constructeurs comptent sur ce qu'on apppelle *le frayé* pour adoucir à la longue les frottements; on espère que l'engrenage, dur et bruyant lorsqu'il est neuf, se fera de lui-même, ses surfaces les plus violemment attaquées devant s'user plus vite et s'adapter les unes sur les autres; une analyse un peu attentive ne permet guère de conserver cette illusion, à laquelle la pratique donne de fréquents démentis; quand un engrenage à l'état neuf roule mal, il arrive d'ordinaire que ce défaut s'exaspère avec le temps.

Les moyens réellement efficaces pour atténuer, sinon faire disparaître ces graves inconvénients, sont d'un ordre tout différent : ils consistent à traiter ces organes, au point de vue de l'entretien aussi bien qu'à celui de l'exécution, comme de véritables organes de machines; ici, comme dans bien d'autres cas, les négligences et le laisser-aller sont funestes. Les profils des dents seront calculés avec soin et tracés avec une extrême précision, de manière à reproduire, aussi exactement que possible, les courbes définies par la théorie; les axes seront placés à leur distance rigoureuse et maintenus à cette distance par un entretien attentif, etc. Moyennant ces précautions et quelques autres de même nature, on parvient à réduire beaucoup ces bruits fâcheux et ces chocs destructeurs.

Pour ce qui concerne l'exécution des engrenages, l'exemple des constructeurs américains, l'usage qu'ils font si généralement de machines-outils de haute précision, sont précieux à consulter. Ces habitudes d'exactitude dans l'établissement des organes de machines commencent à pénétrer et à se répandre dans nos ateliers, plus lentement peut-être qu'il ne serait désirable. Plus que partout ailleurs, elles sont indispensables en matière d'engrenages. Mais on ne doit pas perdre de vue qu'elles ne sont praticables, économiquement parlant, que dans les usines où l'on a à fabriquer un nombre considérable de pièces sur un même modèle; sinon, les frais de première installation montent à des taux inabordables. Il semble que le travail précis comporte comme point de départ le travail par séries.

C'est ce qu'a bien compris une de nos maisons de construction les plus anciennes et les plus renommées, la maison A. Piat, de Paris. Cette maison s'est fait une spécialité de la construction des organes de transmission en général et, d'une manière toute particulière, des roues d'engrenage. Pour ce qui concerne les roues de modèle courant, la maison Piat les fabrique à l'avance et en détient en magasin des assor-

timents complets de prêtes à livrer. Les roues plus importantes ou d'un type moins habituel se font sur commande, mais les modèles et gabarits sont préparés à l'avance, de telle sorte que la livraison puisse se faire à bref délai. Toutes ces roues sont fabriquées avec le plus grand soin et la plus haute précision, soit dans les ateliers de Paris, soit dans l'usine que la maison possède à Soissons. Les matières premières, fonte ou acier, sont choisies ou essayées avant l'emploi; elles sont mélangées dans des proportions savamment étudiées, et traitées dans des cubilots de forme spéciale, établis pour cet objet. Le moulage mécanique est appliqué de la façon la plus générale; il fournit des produits dont la régularité de forme approche de près celle des roues taillées. Ce mode de moulage s'applique à la roue entière, lorsqu'elle n'est pas de trop fort diamètre, et à la denture pour les grandes roues, qui doivent être faites au trousseau. Pour les roues de précision, la denture est taillée à la fraise sur gabarit, et cette opération est exécutée par les machines-outils les plus perfectionnées.

La maison Piat s'est attachée à répandre l'usage de la roue dite *à chevron*. Cette roue dérive directement de la roue de White : dans la roue de White, comme on sait, la denture, au lieu d'être parallèle à l'axe, est enroulée obliquement sur la jante, suivant une hélice; grâce à ces dispositions, les contacts se font progressivement et avec douceur; mais cette obliquité des surfaces engendre des composantes normales, qui produisent sur les coussinets des réactions énergiques et fâcheuses. M. Piat constitue chaque dent de deux demi-dents de White à obliquités égales et inverses, de manière à former un chevron; il supprime ainsi les inconvénients du système primitif et en conserve tous les avantages; de plus, les dents ainsi établies empruntent à leur forme un supplément important de résistance. Mais, pour réaliser ces idées, il était nécessaire que l'exécution fût irréprochable : une roue à chevron mal faite est plus mauvaise qu'une roue droite. Au cas actuel, entre la conception et l'exécution, l'harmonie est complète. Parmi les pièces exposées par M. Piat, et qui toutes étaient fort remarquables, on admirait la moitié d'une roue en fonte avec denture à chevron; elle pesait 11,000 kilogrammes et était destinée à actionner un gros train de laminoir. Le système de la denture à chevron s'applique d'ailleurs aussi bien aux roues d'angle qu'aux engrenages droits.

On voit, par ces quelques détails, qu'aussi bien au point de vue commercial qu'au point de vue technique, les procédés industriels de la maison Piat se rapprochent beaucoup de ceux pratiqués par les plus célèbres constructeurs américains. Le succès a couronné ces méthodes de travail; la maison Piat, créée en 1831 sur des bases plus que modestes, n'a cessé de développer sa clientèle, ses moyens d'action et sa réputation. Elle a su se faire et se conserver un personnel d'élite, et récompenser ses dévoués collaborateurs à l'aide d'institutions philanthropiques, fondées avec une parfaite entente et entretenues avec une large générosité. C'est là un des côtés de l'industrie moderne les plus dignes d'intérêt, mais que nous devons nous borner à indiquer en passant.

Pris dans leur sens général, les termes *accouplement* et *embrayage* embrassent la

plupart des organes qui servent à relier deux mobiles; il convient ici de restreindre cette signification trop extensive; nous ne considérerons que ce qui concerne les pièces animées de mouvement de rotation continu, telles que les arbres, roues et poulies.

Sous cette restriction, nous avons à considérer deux cas : lorsque la liaison entre les deux mobiles tournants est permanente, on lui donne souvent le nom d'*accouplement;* lorsque, au contraire, la liaison est intermittente et peut être établie ou supprimée à volonté, elle prend les dénominations d'*embrayage, encliquetage, enclenchement,* etc.

Les arbres de transmission qui, dans les ateliers un peu importants, courent sur des centaines de mètres de longueur, sont formés de tronçons que l'on réunit à la suite l'un de l'autre; cet assemblage se fait d'ordinaire très simplement, à l'aide d'un court manchon en une ou deux pièces, claveté sur les deux bouts d'arbres à réunir. Si ce système, qui est tout à fait rigide, donne d'ordinaire entière satisfaction, c'est que la ligne d'arbres à laquelle il s'applique est suffisamment flexible et élastique pour se prêter aux petites irrégularités qui se produisent forcément dans l'alignement.

Mais il n'en est plus ainsi lorsque l'on a affaire à des arbres rigides : la moindre incorrection entraînerait des chauffages et des grippements. Pour ces applications, il est nécessaire que l'élasticité, qui fait défaut dans les arbres, se retrouve dans l'accou-

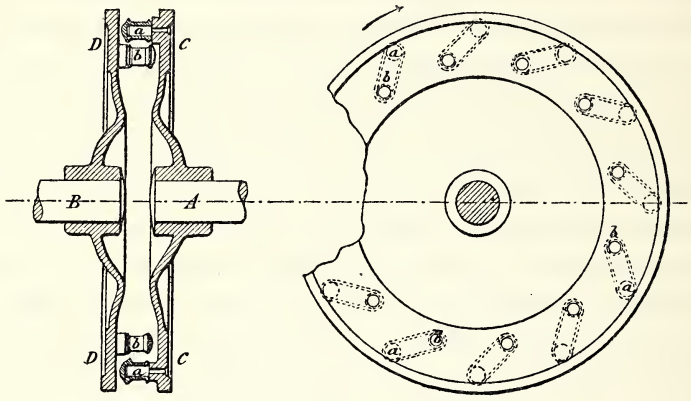


Fig. 240. — Accouplement Raffard.

plement. Tel est l'objet de l'appareil imaginé par M. Raffard, de Paris (fig. 240). Sur l'arbre moteur *A* et l'arbre conduit *B* sont calés deux plateaux parallèles *CC*, *DD*, munis de chevilles *aa* et *bb*; sur ces chevilles s'enroulent des liens obliques, qui vont d'une cheville *a* du plateau moteur à une cheville *b* du plateau conduit; ces liens sont élastiques, en caoutchouc ou en métal; ils s'enroulent sur des galets dont les chevilles sont revêtues. On voit que, grâce à l'interposition de cet accouplement élastique, les petits déplacements relatifs que peuvent prendre les deux arbres n'ont aucun effet fâcheux sur la transmission. Ce dispositif ingénieux, d'invention récente (1885), a déjà reçu de nombreuses et importantes applications; il est surtout employé dans les sta-

tions électriques, pour relier directement la dynamo à l'arbre de la machine motrice. Il donne un mouvement très doux et régulier, même aux grandes vitesses et pour des puissances considérables, et rachète, dans une notable mesure, les irrégularités périodiques de la vitesse du moteur.

Les *embrayages,* avons-nous dit, sont des organes qui permettent d'établir ou de supprimer à volonté la solidarité entre deux arbres. Lorsque l'opération peut se faire au repos, elle ne présente aucune difficulté, et les dispositifs les plus simples permettent de l'exécuter; on se sert, suivant les cas, de clavettes, de boulons, de manchons, de griffes, etc.

Bien autrement difficile est le problème de l'embrayage en mouvement. Étant donné un arbre qui tourne, si l'on cherchait à le solidariser brusquement avec un autre arbre au repos, on causerait infailliblement des ruptures et des accidents. Changer subitement le repos en mouvement, c'est agir par choc, et le choc est très violent pour peu que la vitesse imprimée ou les masses mises en jeu soient grandes. Il est donc indispensable que la transition soit ménagée, que la vitesse de l'arbre commandé croisse progressivement, et qu'elle n'atteigne que peu à peu celle de l'arbre conducteur. Il faut, en outre, que l'appareil remplisse toutes les conditions d'un bon mécanisme, qu'il soit simple, robuste, facile à manœuvrer, peu exposé aux accidents, etc. Lorsqu'on a affaire à de grandes vitesses et à des efforts un peu considérables, toutes ces difficultés s'accroissent et se compliquent.

La question est délicate; pendant longtemps on s'est contenté de la tourner, plutôt que de l'aborder franchement. Cependant l'Exposition de 1878 montrait un embrayage puissant et fonctionnant dans de bonnes conditions, l'embrayage Pouyer-Quertier.

Pour les faibles puissances, la solution est trouvée et appliquée depuis fort longtemps : c'est l'embrayage par courroie et poulies folle et fixe. L'arbre moteur porte un large tambour; l'arbre conduit porte deux poulies très voisines, l'une calée, l'autre folle; une courroie, de la largeur de l'une des deux poulies, est jetée sur les deux arbres; elle peut voyager sur le tambour et passer sur l'une ou l'autre des poulies; une simple fourchette en produit à volonté le déplacement; suivant que la poulie fixe ou la poulie folle sont en prise, l'arbre tourne ou reste immobile. Des combinaisons de poulies, de courroies et d'engrenages permettent, au besoin, de faire mouvoir l'arbre conduit dans un sens ou dans l'autre, ou de laisser immobile, suivant la position que l'on donne à la fourchette. On remarquera qu'au moment où la poulie fixe vient en prise, la courroie commence par glisser; ce n'est que progressivement, et en vertu du frottement, que l'arbre conduit prend sa vitesse; les conditions rappelées ci-dessus sont donc bien remplies par ce système d'embrayage.

Pour que l'on se décidât à attaquer sérieusement ce problème de mécanique, il a fallu des nécessités impérieuses; elles se sont présentées presque simultanément dans deux industries fort distinctes : les tramways funiculaires à câble continu et les sta-

tions d'électricité. Nous voyons ici un nouvel exemple de cette réaction intense qu'a exercée, sur les industries mécaniques, le développement des industries électriques.

Dans l'embrayage par poulies fixe et folle, c'est au frottement que l'on s'est adressé pour la mise en mouvement progressive; c'est également au frottement que l'on a recours dans les appareils plus puissants; mais ici les efforts à produire sont beaucoup plus grands et les actions mises en jeu doivent être plus énergiques.

L'ancien embrayage à cône et contre-cône de friction n'est plus guère employé : les cônes ne doivent pas être trop aigus, sans quoi ils se coincent et on ne peut plus les dégager pour débrayer; dès lors, il faut, pour produire l'entraînement, appuyer fortement les deux cônes l'un sur l'autre, c'est-à-dire exercer, suivant l'axe des arbres, un effort considérable, qui engendre des frottements et une usure rapide. Les cônes multiples et les plateaux à rainures circulaires soulèvent également de sérieuses objections.

Le système d'embrayage imaginé par MM. Mégy, Echeverria et Bazan était présenté, à l'Exposition de 1889, par MM. Sautter, Lemonnier et Cie, de Paris. Il figurait déjà à l'Exposition de 1878 et a donné lieu, depuis lors, à des applications nombreuses. L'organe principal de cet embrayage est, comme on sait, une lame de ressort en acier, courbée en forme de cercle et qui s'appuie sur la paroi intérieure d'un tambour creux; la pression sur la paroi et le frottement qui en résulte diminuent lorsqu'on rapproche les deux bouts de la lame, et inversement. Ce principe ingénieux peut être utilisé de bien des manières; l'exposition de MM. Sautter, Lemonnier et Cie en montrait des applications fort intéressantes à divers mécanismes : appareils de levage, appareils régulateurs de la descente des charges, à l'aide de la force centrifuge agissant sur la lame d'acier, transmission électrique à un treuil roulant, etc.

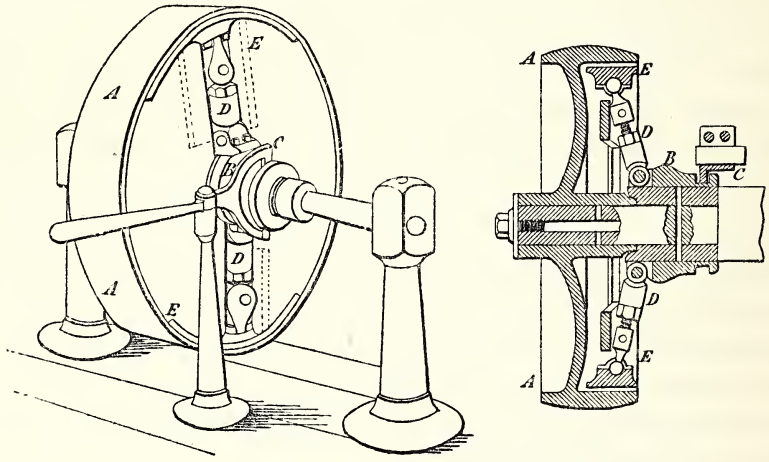


Fig. 241. — Embrayage Mason.

MM. Mason (Volney W.) and Co, de Providence (États-Unis), exposent le système d'embrayage représenté par la figure 241. La poulie *AA* est folle sur l'arbre et le

manchon *B*, claveté sur cet arbre, peut glisser vers la gauche, sous l'action de la fourchette *C*; dans ce mouvement, les deux bielles *DD* s'ouvrent et appliquent fortement contre la jante de la poulie les sabots *EE*. Le mode d'action de ce mécanisme semble, au premier abord, un peu brutal.

M. A. Piat, de Paris, construit un embrayage du système Deliège (fig. 242) et dans lequel ces défauts sont habilement évités; les bielles sont remplacées par des lames de ressort *AA*, qui appuient contre la jante de la poulie des coins en bois; pour que le serrage soit complet, il faut que la corde qui sous-tend les ressorts ait légèrement dépassé la normale à l'axe de rotation; dès lors l'embrayage conserve de lui-même sa position, sans l'intervention de la fourchette, qui se trouve ainsi complètement dégagée et n'engendre plus aucun frottement. La force de ces ressorts est calculée en vue de l'effort maximum que l'appareil a à transmettre; si, par accident ou négligence,

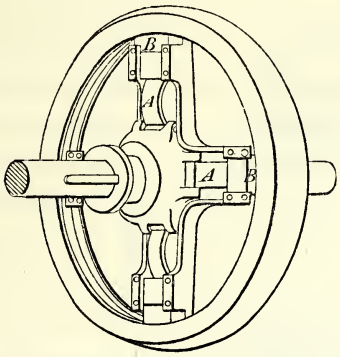


Fig. 242. — Embrayage Deliège.

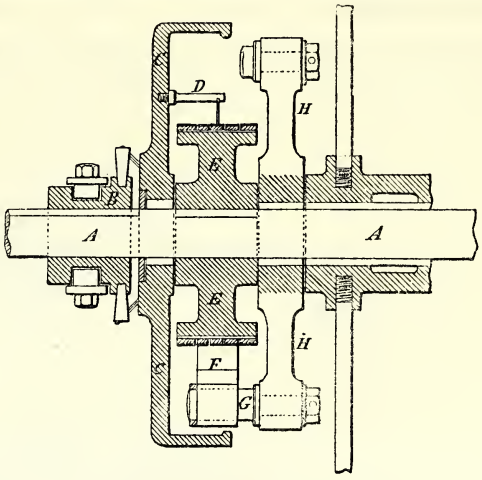


Fig. 243. — Embrayage Brancher.

cet effort vient à être dépassé, le glissement se produit, et aucune rupture n'est à craindre. Cet embrayage, interposé sur le parcours d'une transmission, constitue donc un véritable organe de sécurité.

M. Brancher (M. Antoine), de Paris, s'est préoccupé de multiplier l'adhérence obtenue par simple appui, en se servant du dispositif imaginé récemment par M. Lemoine, et appliqué d'une façon si heureuse à la manœuvre des freins des omnibus. L'organe essentiel de ce dispositif est une corde, qui fait plusieurs tours sur un cylindre adapté au moyeu de la roue à freiner; si l'on tire, même légèrement, sur un des bouts de la corde, il se produit entre cette corde et le cylindre une adhérence énergique, et le sabot de frein, relié à l'autre extrémité de la corde, est vigoureusement appliqué sur la jante de la roue.

L'embrayage Brancher est représenté en coupe dans la figure 243. Sur l'arbre

moteur *AA* est monté fou un plateau *HH*, qu'il s'agit d'embrayer; à cet effet, cet arbre entraîne un manchon *B*, qui peut coulisser dans le sens de la longueur, et venir s'appliquer sur le moyeu du plateau *CC*, fou sur l'arbre; ce plateau agit, par la broche *D*, sur le bout d'un ruban lâche, en cuir et acier, enroulé plusieurs fois sur le galet *EE*, lequel est calé sur l'arbre de couche; l'autre bout du ruban est relié par la manivelle *F* et la broche *G* au plateau *HH*. A l'Exposition, l'appareil était appliqué sur la commande d'une dynamo faisant 1,400 tours à la minute.

MM. Gustin aîné et fils, de Deville (Ardennes), exposent des embrayages de divers systèmes. L'un d'eux procède du principe de l'encliquetage Dobo : l'entraînement d'un tambour creux est obtenu par l'arc-boutement de palettes presque normales à l'axe; de sorte que le mouvement relatif du tambour s'opère sans résistance dans le sens qui tend à coucher les palettes; dans le sens opposé, le mouvement du tambour est solidaire de celui de l'arbre.

La figure 244 représente un dispositif qui résout le même problème, mais sous une forme plus constructive. *A* est un arbre mis en mouvement par un moteur; *G* est l'arbre

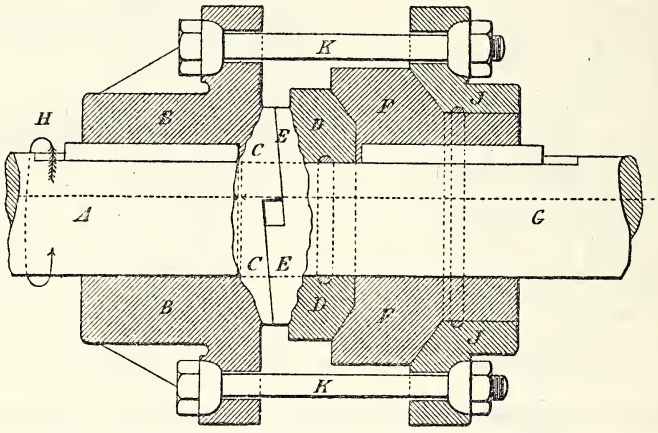


Fig. 244. — Embrayage Gustin.

de transmission, actionné par plusieurs moteurs; cet arbre *G* doit être entraîné par *A* lorsque le moteur est en marche; il doit, au contraire, s'en dégager spontanément lorsqu'on arrête l'arbre *A*. Sur *A* est calé le manchon *BB*, solidaire des griffes hélicoïdales *CC*; le manchon *DD*, libre sur l'arbre *G*, porte les contre-griffes *EE;* l'autre face du même manchon est taillée en cône, s'adaptant à un cône creux venu dans le manchon *FF*, calé sur *G*. Supposons l'arbre *A* et son manchon *BB* tournant dans le sens de la flèche *H*; la griffe *C* s'appuie sur *F*, repousse *D*, qui vient frotter énergiquement sur la face de *F* et déterminer l'entraînement de *F* et de *G*. Si A s'arrête et que *G* continue à tourner, les talons des griffes viennent en prise, et l'arbre *G* se trouve dégagé. Pour éviter les effets des pressions longitudinales au moment du serrage, les inventeurs

ajoutent l'anneau fou *JJ*, retenu par les boulons *KK*; le manchon *FF*, solidaire de la rotation de *G*, peut coulisser sur cet arbre pour s'appliquer sur l'anneau *JJ*.

Les machines à vapeur exposées par la maison Joseph Farcot, de Saint-Ouen (Seine), actionnaient un arbre de transmission tournant à 300 tours par minute; dans le prolongement de cet arbre était installée la dynamo de 500 chevaux de M. Marcel Deprez, et le mouvement était donné à cette dynamo par l'intermédiaire d'un embrayage puissant, également construit par la maison Farcot. Cet embrayage est constitué par deux cônes correspondants, tournant chacun avec les bouts d'arbres à relier, et pouvant être serrés fortement l'un contre l'autre; le serrage est obtenu par des boulons, mis en mouvement par des roues satellites, qui engrènent avec une denture solidaire d'une poulie folle montée sur l'arbre moteur; si l'on arrête cette poulie, les boulons se vissent et serrent les cônes; l'arrêt est produit à la main par un frein à ruban. Une autre poulie, actionnée également par un frein à ruban, produit le desserrage. Ces manœuvres sont faciles et sûres.

M. Snyers (Raymond), de Bruxelles, exposait un système de frein extrêmement original, pouvant fonctionner aussi comme embrayage. L'organe essentiel est une sorte de brosse en fils d'acier, solidaire de l'un des deux corps à relier; l'autre corps est muni de saillies rigides, qui, au moment voulu, viennent frotter contre les fils de la brosse; la vitesse relative est ainsi absorbée progressivement, mais très promptement; l'action peut d'ailleurs être modérée et réglée à volonté : elle dépend, toutes choses égales, de la quantité dont les saillies rigides pénètrent au-dessous du plan formé par les extrémités des fils; plus la pénétration est profonde, plus l'action est énergique.

M. Snyers présentait divers modèles des applications de son frein, et en expliquait le fonctionnement à l'aide d'expériences fort démonstratives; il y avait, entre autres modèles, un frein pour machines, un parachute pour cage de mine, un embrayage pour transmission, un dispositif pour relier les trains de chemin de fer aux appareils fixes de la voie. L'idée de M. Snyers est certainement ingénieuse et peut être susceptible d'intéressantes applications.

Pouvoir établir ou supprimer à volonté la liaison entre deux organes, en limitant leurs réactions réciproques, tel est en deux mots le problème des embrayages. Ce problème est résolu d'une façon satisfaisante pour le cas où l'un des deux organes est immobile; cette solution est fournie par les freins. Pour le cas où les deux organes à relier sont en mouvement, on ne saurait dire qu'une solution un peu générale soit intervenue, en dépit des recherches et des inventions ingénieuses qui se sont produites depuis quelques années. Et cependant la question présente un intérêt considérable, qui n'est pas limité, tant s'en faut, aux applications immédiates; elle a une portée beaucoup plus étendue. L'embrayage idéal, possédant à la fois la puissance, la docilité et

la sûreté, rendrait, dans mille circonstances, des services appréciables. On peut s'en faire une idée en considérant la transformation profonde qu'a produite, dans l'industrie des chemins de fer, l'introduction des freins manœuvrables à distance. Pour la solution d'un pareil problème, qui comporte de si multiples sujétions, il ne paraît pas que les mécanismes ordinaires puissent suffire; il faut des agents plus souples, plus maniables. Les fluides sous pression ou l'électricité nous réservent peut-être de nouvelles et prochaines surprises.

SECTION III.

TRANSMISSIONS DIVERSES.

SOMMAIRE.

Arbre flexible.
Transmissions à grande distance. — Généralités.
Transmissions mécaniques. — Câble télodynamique. — Tramways funiculaires.
Transport par réservoir.
Transport par canalisation. — Division. — Air comprimé. — Eau sous pression : l'*Hydraulic Engineering C°*. — Eau chaude : distribution de Boston — Vapeur : distribution de New-York. — Courants électriques; historique sommaire; propriétés et emplois.
Des combustibles comme véhicules du travail.
Résumé.

Dans notre rapport sur l'Exposition de 1878, nous avons signalé un mode de transmission, alors tout nouveau : l'arbre flexible de *Stow,* corde métallique, à un bout de laquelle un moteur imprime une rapide rotation, et qui, par son autre extrémité, transmet ce mouvement à un outil, sans cesser, pour cela, de se prêter à toutes les courbes et sinuosités que nécessitent les circonstances. Ce système présente de précieux avantages lorsqu'il s'agit de traiter des pièces lourdes, encombrantes ou difficiles à manœuvrer; en pareil cas, la pièce reste immobile et l'outil, conduit par le câble flexible, vient l'attaquer successivement en divers points. Ce mode de transmission a reçu, dans ces dernières années, d'assez nombreuses applications, quelques-unes fort importantes. Pour ne parler que de ce qui concerne la construction mécanique, on se sert avec avantage du flexible de Stow dans les ateliers de chaudronnerie, pour percer les trous de rivet dans les tôles, ou les trous d'entretoise dans les boîtes à feu des locomotives.

La commande des fraises, forets et autres outils rapides se fait bien par le flexible.

Cette transmission se recommande par son bas prix et surtout sa commodité et sa souplesse.

Le câble flexible ne convient que pour les transmissions à petite portée. Quand il s'agit d'envoyer le travail à des distances un peu grandes, il faut recourir à des moyens plus souples encore et surtout plus puissants.

Cette question du transport et de la distribution de la puissance est peut-être l'une des plus graves et des plus importantes de celles qui s'imposent de nos jours aux recherches des mécaniciens. Nous avons eu, à plusieurs reprises, l'occasion d'en examiner des solutions particulières; mais il ne sera pas hors de propos d'étudier, dans ces lignes générales, ce vaste problème, et d'en résumer rapidement la situation, telle qu'elle se présente au moment actuel.

Cette situation peut se définir en quelques lignes. Si nous faisons abstraction d'un

IMPRIMERIE NATIONALE.

petit nombre de tentatives isolées, qu'on peut, sans risques d'erreur, assimiler à des tâtonnements préliminaires, aux pas hésitants du début, nous voyons toutes les industries mécaniques établies, pour ainsi dire, sur un même patron : le générateur de l'énergie est installé à petite distance de l'outil qu'il doit faire mouvoir; la distance se mesure par quelques décamètres. Quelquefois, lorsque l'emplacement du générateur est imposé, c'est l'outil qui vient se mettre à proximité : c'est ainsi que les usines mues par la puissance hydraulique s'installent dans le voisinage de la chute d'eau. Dans d'autres cas, on n'hésite pas, même au prix de sacrifices considérables, à déplacer le moteur pour le mettre à la portée de l'outil à mouvoir : les ateliers mus par la vapeur rentrent dans cette catégorie; et c'est peut-être dans cette possibilité de pouvoir, à la rigueur, se prêter à des conditions difficiles d'installation, que la machine à vapeur doit la plus grande part de son succès.

Mais, de cette cohabitation nécessaire entre le producteur et le consommateur de travail, soumis à des exigences le plus souvent contradictoires, résultent des sujétions qui deviennent d'année en année plus difficiles à tolérer. Du jour où elles seraient supprimées, l'industrie recevrait un élan dont la portée est incalculable. C'est là un sentiment qui commence à se répandre, d'une façon plus ou moins nette, plus ou moins consciente, dans tous les esprits que préoccupent les problèmes industriels et économiques.

Choisir, pour la production de l'énergie l'emplacement le mieux approprié par les circonstances naturelles; transporter cette énergie au loin et la distribuer dans les ateliers où elle doit être consommée; puis la recueillir pour l'utiliser sur les outils, voilà les trois stades que comporte cette immense question. Laissons de côté le premier de ces termes : la production de la puissance a été étudiée dans d'autres parties du présent rapport; quant au troisième terme, l'étude des récepteurs ne peut être faite qu'une fois déterminé l'agent qui sert à la transmission du travail, car ils sont sous la dépendance absolue de cet agent. Nous nous en tiendrons, pour le moment, à ce qui concerne le transport. Les distributions actuelles de puissance, si rares encore et si restreintes qu'elles puissent être, n'en présentent pas moins un très grand intérêt; il importe de les étudier et de définir avec précision l'état des choses tel qu'il se présente aujourd'hui.

Les procédés en usage pour transporter l'énergie peuvent être ramenés à trois types :

Dans certains cas, le travail est transporté à l'aide d'organes solides, rigides ou souples, à la façon des transmissions ordinaires d'atelier; nous désignerons par *transmission mécanique* ce mode de transpprt.

D'autres fois, le travail produit est emmagasiné au départ dans des réservoirs, qui sont ensuite expédiés comme des marchandises par les voies de transport ordinaires, jusqu'au lieu d'emploi; ce sera pour nous le *transport par réservoirs*.

Enfin on fait usage de conduites, composées d'éléments immobiles, mais dans les-

quelles circule un fluide qui transporte l'énergie dont il a été chargé à l'usine génératrice; c'est le *transport par canalisation.*

Il va de soi que ces divers modes de transport peuvent se combiner entre eux de bien des manières, ce qui donne naissance à des systèmes mixtes, en nombre indéfini.

Comme transmission mécanique, le seul procédé qui ait été appliqué sur une échelle un peu étendue, c'est le câble télodynamique, imaginé en 1850 par Ferdinand Hirn. Il consiste, comme on sait, en un câble métallique sans fin, roulant à grande vitesse sur deux ou plusieurs poulies à gorge. C'est en somme, sur un plus large format, la transmission par courroie, si usitée dans les ateliers. On s'en est servi pour envoyer quelques centaines de chevaux-vapeur à des distances ne dépassant pas quelques kilomètres.

Si intéressantes que puissent être ces applications, on ne saurait voir dans ce système la solution générale du problème que nous avons en vue. A propos des transmissions funiculaires, il convient de rappeler la solution qu'elles ont fournie à un problème des plus importants, qui touche par plus d'un point à celui que nous étudions, à savoir : la traction sur les tramways et les chemins de fer à *fortes déclivités.*

Le transport d'énergie par réservoirs a donné lieu à un grand nombre d'essais, dont quelques-uns ont fourni des résultats intéressants. Les principaux agents auxquels on s'est adressé sont l'air comprimé, l'eau chaude et l'électricité.

L'air comprimé (procédé Mékarski) est emprisonné sous forte pression dans des réservoirs résistants. L'eau, chauffée à 200 degrés (procédé Lamm et Francq) par une injection de vapeur, est contenue dans de solides récipients, enveloppés de matières isolantes; la chaleur que renferme l'eau est suffisante pour dégager de la vapeur et alimenter pendant un certain temps une machine à vapeur ordinaire. L'électricité est emmagasinée dans des accumulateurs à lame de plomb (procédé Planté), lesquels, transformés par cette opération en piles secondaires, fournissent, au moment voulu, le courant à une dynamo réceptrice.

Ces trois procédés, qui ont reçu les uns et les autres des applications importantes, présentent un inconvénient commun : c'est le poids du réservoir, qui est énorme en comparaison de la quantité d'énergie emmagasinée. Ils ne peuvent être employés avec avantage que dans des circonstances absolument spéciales, où le prix de revient du travail devient une considération secondaire, où la quantité d'énergie et la distance de transport sont faibles; ces conditions se trouvent réunies dans la traction des tramways, et c'est pour cet usage que les procédés dont il s'agit ont le mieux réussi.

Arrivons au troisième système, la canalisation de l'énergie; il présente un intérêt d'une tout autre nature, et par l'importance des applications qu'il a déjà reçues, et

par les espérances qu'il permet de concevoir. Les principaux agents employés aujourd'hui pour cet objet sont :

L'air comprimé ou raréfié;
L'eau sous pression;
L'eau chaude;
La vapeur d'eau;
Les courants électriques.

L'air comprimé a trouvé ses plus importants emplois dans les travaux de mines et dans le percement des souterrains; mais ici la nature même du fluide a été la cause principale qui en a déterminé l'adoption : en apportant le travail au fond des étroites galeries, l'air comprimé en assure la ventilation.

A part ces cas spéciaux, il y a quelques applications isolées; parmi les canalisations d'air sous pression, la plus importante qui ait été mise en service est celle établie à Paris par la Compagnie de l'air comprimé. Nous avons étudié précédemment cette installation, qui est des plus remarquables au point de vue technique. Il ne paraît pas jusqu'ici que cette initiative hardie ait été suivie par beaucoup d'imitateurs. Quant à la transmission par l'air raréfié, on en est resté au modeste réseau exploité dans le voisinage de la rue Beaubourg par la Société de distribution de force à domicile.

L'eau sous pression a reçu des applications bien plus nombreuses, plus variées, quelques-unes d'une très grande étendue.

Lorsque les circonstances s'y prêtent, la canalisation est établie pour subvenir à la fois au transport de la puissance motrice et à l'alimentation des services domestiques et municipaux. Parmi les exemples d'installations de ce genre, nous avons décrit précédemment la vaste et magnifique distribution de la ville de Genève; sans sortir de l'enceinte de l'Exposition, nous aurions pu en citer plusieurs autres. Dans des cas pareils, la pression est ordinairement réglée sur les besoins du service d'alimentation, plutôt que sur ceux du service de la force motrice, lequel est considéré le plus souvent comme un accessoire; elle ne dépasse guère une quinzaine de kilogrammes par centimètre carré.

Ces pressions modérées deviennent tout à fait insuffisantes lorsque l'objet principal de la canalisation est la distribution du travail mécanique : elles nécessiteraient des conduites absolument exagérées comme dimensions et comme prix. On a recours a des pressions généralement comprises entre 50 et 100 kilogrammes. C'est dans ces conditions que fonctionnent un grand nombre de distributions de puissance; on en trouve dans les docks, les gares centrales de chemins de fer, les ports de mer, etc., et elles y rendent des services inappréciables. Parmi les établissements munis d'engins hydrauliques, on peut citer les ports de Marseille, d'Anvers, la gare Saint-Lazare et la gare des marchandises de la Chapelle, à Paris, etc.

L'Hydraulic Engineering C°, de Chester (Angleterre), exposait les modèles de quelques-unes des machines qu'elle a construites pour la distribution de puissance motrice. Cette opération, entreprise par la *London hydraulic power C°*, comporte aujourd'hui un réseau dont le développement atteint 43 kilomètres. La station centrale, qui fabrique l'eau comprimée, comprend quatre jeux de pompes à vapeur; les machines compound verticales attaquent directement les pistons des pompes de compression; chaque jeu de pompes fournit, en allure normale, 18 litres par seconde, en développant une puissance indiquée sur les pistons à vapeur d'environ 200 chevaux. L'eau comprimée est envoyée sous deux accumulateurs, de 7 mètres de course et 508 millimètres de diamètre, dont la charge correspond à une pression de 53 kilogrammes par centimètre carré; un accumulateur de relais est en outre interposé sur le parcours de la distribution. La canalisation principale se compose de quatre conduites maîtresses, de 152 millimètres, formant deux circuits fermés, sur lesquels se branchent les conduites secondaires. L'eau est puisée dans la Tamise à l'aide de pompes nourricières (pompes centrifuges et pulsomètres) et envoyée dans des réservoirs; elle passe à travers des filtres en éponges avant d'être reprise par les pompes de compression. La fourniture d'eau est mesurée et payée au compteur. Le prix du cheval est assez élevé (0 fr. 43 à 1 fr. 27 à l'heure).

Les appareils récepteurs desservis par cette distribution sont nombreux et variés; ce sont principalement des monte-charge, des ascenseurs et des grues, c'est-à-dire des machines élévatoires à mouvement discontinu; mais il y a aussi quelques moteurs Brotherhood et pompes de médiocre puissance. Cette eau comprimée sert également pour actionner des bouches d'incendie; l'appareil employé à cet effet est curieux par sa simplicité et son ingéniosité : les eaux de la canalisation urbaine ont une charge trop faible pour suffire au service des incendies; l'eau à forte pression de l'*Hydraulic power C°* permet de tourner la difficulté; elle est lancée par un tuyau fonctionnant à la façon d'un injecteur; la veine ainsi obtenue entraîne, par appel latéral, l'eau de la conduite urbaine et lui communique ainsi une vitesse suffisante, pour que le jet puisse atteindre efficacement les étages supérieurs des plus hautes maisons.

Le système que nous venons de décrire répond d'une manière particulièrement heureuse aux conditions locales du service à faire. Le périmètre à desservir n'est pas très étendu, les industries y sont fort condensées et les récepteurs à alimenter sont nombreux, de petite puissance et presque tous à manœuvre intermittente; ce sont, pour la plupart, des machines de levage. Dans de pareilles circonstances, la manœuvre hydraulique est tout naturellement indiquée. Le travail mécanique total qu'absorbe un appareil de levage est, en général, peu important, si considérables que soient les efforts qu'il ait momentanément à produire; de telle sorte que le prix unitaire de travail, même s'il est élevé, n'a en somme qu'une importance secondaire; par contre, l'eau étant incompressible assure aux manœuvres la précision, la douceur, beaucoup de commodité et une grande sécurité. D'autre part, dans les appareils de levage, la durée de la

manœuvre proprement dite est beaucoup plus petite que celle des intermittences; lorsqu'un grand nombre de récepteurs de cette nature sont branchés sur une même conduite, il s'établit, dans l'ensemble, une allure moyenne, bien inférieure à celle correspondant à la somme des travaux maximum que peuvent développer tous les appareils marchant à la fois; de sorte que le système de la canalisation et des accumulateurs peut être tenu dans des proportions acceptables.

Le travail transmis par l'eau comprimée revient à un prix élevé; cela tient à deux motifs principaux. Le premier, c'est que la canalisation est très chère d'établissement, eu égard à la quantité de travail qu'elle peut débiter : dans la distribution de Londres, chaque conduite maîtresse, de 152 millimètres de diamètre, ne débite guère que 120 chevaux. Le second, c'est que le travail fourni aux récepteurs est dépensé d'une façon peu économique; chaque cylindre absorbe le même volume d'eau, et ce volume a été établi en vue des plus grands efforts à produire; au-dessous de ce maximum qui, dans aucun cas, ne peut être dépassé, la dépense est toujours la même, si petite que soit la charge; il en résulte que le rendement, c'est-à-dire le rapport du travail de la charge utile élevée au travail communiqué aux pompes de compression, est en général fort minime.

Il est vrai qu'à l'aide de certains artifices, cette difficulté peut être quelquefois tournée. C'est ainsi que l'un des récepteurs hydrauliques exposés par M. Samain, et dont on a vu plus haut la description, permet de proportionner la dépense d'eau comprimée au travail réellement effectué; mais cette solution ingénieuse ne s'applique qu'à des cas particuliers; et d'ailleurs elle n'a pas encore acquis la consécration d'une pratique prolongée. On peut donc dire que la difficulté signalée subsiste aujourd'hui tout entière.

Une distribution de travail par l'eau surchauffée fonctionne à Boston. Elle comporte une double canalisation, l'une pour l'eau chaude au départ, l'autre en retour pour l'eau refroidie. L'eau est chauffée dans des chaudières installées dans une station centrale; le mouvement est imprimé au fluide à l'aide de pompes. Le liquide, porté à une température de 205 degrés, a une double destination : il sert à la fois au chauffage des appartements et à la production du travail moteur, au moyen de machines actionnées par la vapeur que dégage l'eau chaude. Cette canalisation a été mise en service en décembre 1888; l'essai est trop récent pour qu'il soit possible d'en tirer des conclusions pratiques; d'autre part, la complication du double service qui incombe à cette distribution jette quelque trouble sur les résultats et ne permet guère des déductions précises pour ce qui concerne la transmission du travail.

Il est certain que, toutes choses égales, la puissance d'une conduite d'eau chaude, au point de vue du transport de l'énergie, est beaucoup plus grande que celle d'une conduite d'eau comprimée froide. Les pertes de chaleur par rayonnement et conductibilité peuvent être réduites à peu de chose par des enveloppes isolantes convenable-

ment organisées. Reste la question de sécurité; or, il faut bien l'avouer, ce n'est pas sans de graves appréhensions que l'on envisage ces masses énormes d'eau chaude et à pression élevée, circulant sous les pieds du public et dans l'intérieur des habitations; dans de pareilles conditions, le moindre incident peut amener des conséquences formidables.

Il existe à New-York une canalisation de vapeur importante et de grande étendue; elle a été mise en service en 1884, et a pris, depuis cette époque, des développements assez considérables. La vapeur est fournie par deux stations centrales. La plus importante, placée dans la Cité de New-York, quartier central des affaires, est un bâtiment à trois étages et comporte 48 chaudières, 16 par étage; ces générateurs, de 250 chevaux chacun, sont du système Babcock et Wilcox; un quatrième étage sert de magasin à charbon; la houille est élevée par des monte-charge jusqu'au magasin et distribuée dans des trémies, d'où elle descend par son propre poids et est amenée par des couloirs en face de chaque chaudière; le service des cendres est fait également par couloirs et wagonnets. La vapeur est fournie à la pression moyenne de 4 kilogr. 9. La canalisation est faite en tuyaux joints à brides; les conduites maîtresses ont de 152 à 400 millimètres de diamètre; une conduite de retour, qui accompagne la conduite de vapeur, sert à ramener à la station centrale les eaux de purge et de condensation. Des précautions particulières sont prises pour atténuer les fuites et les déperditions de chaleur, pour assurer la purge des eaux condensées et la libre dilatation des conduites. La canalisation principale a environ 8 kilomètres de développement; elle dessert plus de 500 abonnés, dont quelques-uns prennent des puissances de 200 à 300 chevaux; en hiver, la consommation totale dépasse 5,000 chevaux. La vapeur sert à actionner des moteurs, dont l'échappement fournit au besoin la chaleur nécessaire au chauffage des locaux. La vapeur consommée se paye au compteur; l'instrument employé fournit un jaugeage basé sur l'écoulement du fluide par un orifice, dont la section varie en raison de la différence des pressions qui règnent en amont et en aval.

On a beaucoup discuté sur les valeurs comparées des deux systèmes de New-York et de Boston. La comparaison est en effet assez délicate : en théorie, la canalisation d'eau chaude semble devoir être moins coûteuse à établir; mais en pareilles matières, les circonstances locales ont une influence souvent prépondérante. Ce serait à l'expérience à prononcer; mais, dans les deux cas, l'expérience est trop récente pour être décisive. Au point de vue de la sécurité publique, la canalisation de vapeur soulève, à peu de chose près, les mêmes craintes que la canalisation d'eau chaude.

La question du transport du travail par l'intermédiaire des courants électriques ne rentre pas dans les attributions de la classe 52 : elle en a été détachée par le règlement de l'Exposition. Néanmoins, elle intéresse à un si haut degré les mécaniciens,

qu'il n'est pas possible d'en faire abstraction dans un rapport sur la mécanique générale. Sans donc sortir des limites qui nous sont assignées, sans entrer dans l'examen des appareils et des procédés, nous l'étudierons rapidement, en nous en tenant aux résultats mécaniques qui ont été réalisés jusqu'à ce jour.

L'idée de transmettre l'énergie à distance à l'aide d'un conducteur parcouru par un courant électrique a pris naissance presque en même temps que la science de l'électricité; on en retrouve les traces dans les travaux des premiers expérimentateurs qui, au siècle dernier, soumirent à leurs investigations le mystérieux fluide. Cette idée prit peu à peu du corps et de la consistance, au fur et à mesure que se développèrent les notions que l'on possédait sur les propriétés de l'électricité; c'est ainsi que de nouveaux projets furent mis en avant à l'occasion des découvertes du courant dynamique, de l'électro-magnétisme, de l'induction, etc. L'une des premières applications industrielles fut le télégraphe électrique, qui prit rapidement une extension énorme. Mais la quantité d'énergie mise en jeu dans le fonctionnement du télégraphe est tellement minime, qu'on ne saurait considérer un fil télégraphique comme un véhicule de la puissance dans le sens industriel du mot. Vers la même époque, diverses propositions plus précises furent présentées; il suffira de mentionner le projet de distribuer, à l'aide d'un courant électrique, le travail recueilli à la chute d'eau produite, sur la Seine, à Paris, par la retenue de la Monnaie.

Dans l'intervalle, les machines à induction commençaient à sortir de l'état embryonnaire; l'admirable invention de Gramme fit faire un pas énorme à la question. Une démonstration décisive fut produite en 1873, à l'Exposition internationale de Vienne en Autriche; elle avait été organisée par M. Fontaine, administrateur de la Société Gramme : une dynamo, actionnée par une machine à gaz, transmettait, par un fil conducteur, le courant à une autre dynamo installée à une distance de 1,100 mètres; cette réceptrice mettait en mouvement une petite pompe centrifuge, en développant un travail d'environ un demi-cheval. L'expérience était saisissante; elle fut fort remarquée; on fut frappé surtout de l'extrême souplesse du conducteur intermédiaire, qui se prêtait à tous les contours, se glissait dans tous les passages, sans que l'effet obtenu en fût affecté.

Le principe était posé; mais les choses allèrent d'abord lentement; citons, parmi les essais pratiques, quelques tentatives qui eurent du retentissement. En 1879, MM. Chrétien et Félix font, à Sermaize, des essais de labourage mécanique à l'aide d'une charrue tractionnée par des dynamos. En 1881, l'Exposition d'électricité de Paris marque, on peut le dire, le point de départ d'une ère nouvelle, celle des applications industrielles de la transmission électrique; cette exposition comportait un spécimen de transport d'énergie par dynamos génératrice et réceptrice, reproduisant, dans ses lignes principales, l'expérience de 1873 : mais la nouveauté la plus intéressante, au point de vue qui nous occupe, c'était le petit tramway électrique de 500 mètres de longueur, qui reliait le palais de l'Exposition à la place de la Concorde : il avait été

établi et était exploité par MM. Siemens. Ce fut un des premiers exemplaires de ces tramways à traction électrique, qui s'étendent aujourd'hui sur des milliers et des milliers de kilomètres, et constituent l'une des industries les plus considérables et les plus actives de notre époque.

A la suite de l'Exposition de 1881, les essais se multiplient; citons, entre beaucoup d'autres, les expériences faites à Munich en 1883, où une puissance d'un demi-cheval fut envoyée à une distance de 57 kilomètres; celles organisées la même année à Paris, à la gare du Nord, par M. Marcel Deprez, sous le généreux patronage de MM. de Rothschild; et enfin la célèbre expérience de 1885, installée sous les auspices des mêmes personnes, entre Paris et Creil. Cette expérience, beaucoup plus importante, revêtit un caractère réellement industriel : la distance entre la génératrice (Creil et la réceptrice (Paris) était de 56 kilomètres; la puissance développée par la réceptrice atteignit 50 chevaux.

A partir de ce moment, les applications pratiques de la transmission électrique prirent une rapide extension. Dans la plupart des cas, la canalisation électrique a pour fonction principale la distribution du courant en vue de l'éclairage, et le travail proprement dit n'est que l'accessoire; mais souvent aussi elle a pour mission exclusive d'envoyer la puissance mécanique; c'est pour cet objet qu'elle est installée dans un grand nombre de mines, dans des ateliers de toutes destinations, dans les établissements les plus divers; c'est en vue de la transmission de la force que l'on étudie l'utilisation de puissantes chutes d'eau, soit artificielles, comme celle que l'on veut créer sur le Rhône à Lyon, soit naturelles, comme les cataractes du Niagara. Mais, de toutes les applications réalisées jusqu'à ce jour, la plus importante, la plus étendue est celle qui a été faite, sur une échelle immense, à la traction des tramways. Dans tous les pays où elle a été essayée, elle a promptement pris la première place et laissé loin derrière elle tout autre mode d'exploitation. Ce succès rapide et presque inattendu est plein d'enseignements précieux. Sans être trop présomptueux, on peut prévoir le moment où, même sur les grandes lignes de chemin de fer, le conducteur électrique aura remplacé cette usine ambulante qu'on appelle *la locomotive,* et qui, en dépit des efforts et du talent qui sont consacrés à son amélioration, se fait chaque jour plus lourde, plus compliquée, plus coûteuse, plus encombrante, plus insuffisante en présence de la vitesse et des charges croissantes qui s'imposent fatalement aux trains de chemin de fer.

Le conducteur électrique, par son petit diamètre, par sa souplesse incomparable, par sa grande puissance de débit, par la sécurité qu'il possède à un degré élevé, constitue un instrument admirable de transport du travail. Dans les conditions ordinaires où on le fait fonctionner aujourd'hui, il ne s'accommode pas encore de portées bien considérables; les parcours habituels ne dépassent guère quelques kilomètres.

Les machines génératrices du courant, telles qu'on les construit actuellement, atteignent un rendement fort élevé et qui n'est pas bien éloigné de l'unité; à ce point de vue, c'est presque la perfection. Les réceptrices, lorsqu'elles fonctionnent à leur allure et

sous leur charge normales, ont également un rendement excellent. Dans les conditions que nous venons de définir, en supposant bien établis et bien proportionnés tous les éléments, la transmission dans son ensemble, comprenant génératrices, réceptrices et conducteurs, donne un rendement mécanique très satisfaisant, équivalent à celui des meilleurs mécanismes de l'industrie. Le rendement baisse sensiblement lorsque l'allure des réceptrices s'écarte des données en vue desquelles elles ont été établies. Eu égard à leur puissance, les dynamos modernes sont des machines légères, peu encombrantes, faciles à déplacer; elles offrent, dans beaucoup de cas, de grandes commodités d'emploi, à tel point que, dès maintenant, elles ont remplacé avec avantage les courroies et transmissions mécaniques dans d'importants ateliers. La conduite de ces machines est demeurée un peu délicate; elles donnent lieu quelquefois à des ratés, et peuvent même subir des avaries et être mises hors de service lorsqu'on n'apporte pas dans leur manœuvre les précautions convenables.

Le plus souvent, le courant est envoyé directement de la génératrice à la distribution; il s'arrête dès que, pour quelque cause que ce soit, la génératrice cesse de fonctionner. Dans certains cas cependant, on adjoint à la distribution des magasins d'énergie, sous forme de piles secondaires, qui sont chargées par la génératrice lorsque la canalisation cesse de débiter ou que son débit est inférieur à la production. Ces magasins, ou accumulateurs, sont des accessoires d'une très grande utilité; ils suppriment ou atténuent les à-coups, et parent aux répercussions violentes et destructives qui résultent des variations d'allure de l'un quelconque des éléments de la transmission. Les accumulateurs électriques, tels qu'on les établit aujourd'hui, ne donnent pas complète satisfaction; ils laissent encore à désirer, sinon comme rendement, au moins comme durabilité, comme puissance d'emmagasinement, comme poids et comme encombrement.

Nous avons tenu, dans ce qui précède, à préciser aussi exactement que possible l'état actuel des transmissions électriques du travail; mais on ne doit pas oublier que le procédé n'en est, pour ainsi dire, qu'à ses débuts. Il ne faut donc pas s'effrayer outre mesure des défectuosités légères que nous avons dû signaler au passage, et qui, sans doute, disparaîtront d'elles-mêmes lorsque le temps aura fait son œuvre de maturation.

Les combustibles tiennent une place à part dans les divers modes de transmission du travail. On peut les rapprocher, suivant les cas, soit des transports par réservoirs, soit des transports par canalisation. Dans les procédés que nous avons étudiés jusqu'ici, la puissance est engendrée artificiellement pour être ensuite envoyée à distance. Avec la plupart des combustibles, il n'en est plus de même; ils constituent des magasins d'énergie qui nous sont délivrés par la nature à l'état de pleine charge. Mais laissons de côté les considérations qui pourraient être appuyées sur ce sujet intéressant, et arrivons à la question pratique.

Dans tous les centres de population un peu importants, il existe aujourd'hui des canalisations très étendues de travail : ce sont les conduites du gaz de l'éclairage. Au

point de vue du transport de l'énergie, les conduites de gaz ont une puissance au moins égale, sinon très supérieure à celle de tous les systèmes de distribution que nous avons étudiés jusqu'ici. Le prix de revient de la force motrice qu'elles débitent n'est pas très élevé, puisque, même dans les villes où le prix du gaz est surchargé artificiellement par des taxes de toute nature, on trouve fréquemment avantage à fabriquer le courant électrique sur place à l'aide d'un moteur à gaz, plutôt qu'à le demander à la distribution d'électricité alimentée par une station centrale. Dans le système que nous examinons, le transport de la puissance est ordinairement l'accessoire, l'éclairage étant l'objet principal de ces sortes de distributions. On a quelquefois proposé d'établir une canalisation spéciale pour force motrice, et de l'alimenter par du gaz non éclairant, obtenu à l'aide des appareils dits *gazogènes*. Le gaz ainsi fabriqué revient à plus bas prix que le gaz de l'éclairage, mais sa puissance calorifique, sous un même volume, est beaucoup plus petite, d'où la dénomination de *gaz pauvre*. Il résulte de cette circonstance qu'à égalité de dimensions, une conduite de gaz pauvre débite beaucoup moins de travail qu'une conduite de gaz riche; pour peu qu'elle soit longue, elle deviendrait fort chère eu égard à son débit en énergie; le système en question n'est donc que bien rarement applicable.

Dans quelques pays favorisés, le gaz combustible sort naturellement du sol sous de fortes pressions, et peut être ainsi canalisé économiquement et envoyé à de grandes distances. D'autres régions sont riches en combustibles liquides, et on les engage dans des conduites, parfois très développées, connues sous le nom de *pipe-lines*. Même sous des dimensions médiocres, un pipe-line possède, en matière d'énergie, une puissance énorme, incomparablement plus grande que tous les autres systèmes précédemment étudiés.

Laissons de côté ces cas exceptionnels, et rentrons dans la pratique ordinaire. Le véhicule d'énergie qui a la portée la plus étendue, c'est le charbon transporté par chemin de fer. La quantité de travail que peut pratiquement dégager un wagon de charbon est comparable à celle que débite, pendant une semaine entière, l'une des conduites maîtresses d'eau comprimée de la distribution de Londres. On a proposé, pour économiser les frais de transport, d'installer sur le carreau de la mine la fabrication de l'énergie que peut dégager le charbon, et d'envoyer ensuite cette énergie à distance grâce à l'un quelconque des moyens de distribution qui sont en usage. Un pareil projet est évidemment chimérique : un chemin de fer transportant du charbon constitue un véhicule de puissance dont aucun des procédés connus n'approche même de loin, ni comme économie, ni comme puissance.

Des considérations qui précèdent, nous ne chercherons à tirer aucune conclusion: ce serait prématuré. Nous nous sommes efforcé de présenter un tableau exact de l'état actuel des choses, de signaler les propriétés caractéristiques des divers modes de transport de l'énergie usités de nos jours. C'est à ce point qu'il est prudent de s'en tenir. La

seule remarque un peu générale qu'on puisse faire, c'est que, le plus souvent, les canalisations les plus puissantes et les plus économiques aboutissent à des appareils récepteurs ou générateurs moins simples et plus coûteux. De là, la répartition qui s'est établie entre les divers procédés, répartition dont l'un des éléments les plus décisifs est précisément la distance à franchir. Mais ce qui est vrai aujourd'hui peut ne plus l'être demain, et, avec les transformations rapides de l'industrie auxquelles nous assistons, un avenir prochain nous réserve peut-être bien des surprises.

SECTION IV.

APPAREILS DE GRAISSAGE, JOINTS.

SOMMAIRE.

Objet et division.

Joints de résistance mobiles. — Par roulement. — Par glissement. — Matière des coussinets, bronzes, métaux blancs, bois. — Matières lubrifiantes, organiques, minérales; modes d'emploi. — Coussinets à billes de Cambon.

Graissage à l'air libre. — Mèches, trous gradués, système Verny, tige vibrante, compte-gouttes, système de la Coux. — Canalisations d'huile. — Graisseurs continus de Piat. — Emploi de la graisse consistante, systèmes Stauffer, Leneveu, etc.

Graissage sous pression. — Graisseur ordinaire. — Variétés, systèmes Pearsons, de la Coux, Mense. — Graissage de la vapeur, systèmes Hamelle, Bourdon, Crosby. — Graisseur Schober. — Graissage par refoulement.

Avertisseur Raffard.

Joints d'étanchéité fixes. — A cru, par matage, divers.

Joints d'étanchéité glissants. — A cru, par cuir, pâteux. — *Presse-étoupe :* garnitures Wanner, Duval, Pile, de la Metallic packing C°.

Tous les mécanismes utilisés dans l'industrie se composent d'organes solides, en contact les uns avec les autres. Dans certains cas, les surfaces en contact servent à transmettre des efforts; dans d'autres cas, elles ont pour objet d'empêcher la fuite des fluides et de constituer les parois de récipients étanches. D'où la distinction entre les joints dits *de résistance* et les joints dits *d'étanchéité.*

De la perfection de ces joints dépend en grande partie le bon fonctionnement des mécanismes, et, comme ils sont extrêmement multipliés, l'art de les bien exécuter joue, en mécanique, un rôle de première importance.

Cet art, si modeste en apparence, ne laisse pas que de soulever des difficultés considérables; pour les résoudre, il a fallu et il faudra encore bien des efforts, des tâtonnements sans fin, des observations incessantes. En cette matière, le progrès se fait lentement, mais il se fait d'une marche continue, accompagnant, ou plutôt précédant les progrès généraux de la mécanique appliquée.

Telle est la question difficile et complexe que nous allons étudier dans la présente section. Suivant la division qui a été rappelée plus haut, nous examinerons successivement les *joints de résistance* et les *joints d'étanchéité.*

Les *joints de résistance,* qui ont pour objet de relier deux organes solides et de transmettre les efforts de l'un à l'autre, se divisent eux-mêmes en deux catégories : les *joints fixes* et les *joints mobiles.* Dans les joints fixes, les surfaces en contact restent en repos relatif : nous n'avons pas à nous occuper, dans la présente section, de cette catégorie de joints. Au contraire, nous étudierons les joints mobiles, dans lesquels les surfaces d'appui se déplacent, tout en restant en contact l'une avec l'autre.

Les joints d'étanchéité se divisent également en deux grandes classes, suivant qu'ils sont fixes ou glissants. Nous étudierons ces deux classes.

La présente section comprend, en résumé, l'examen des objets suivants :

Joints de résistance mobiles, avec l'étude des matériaux qui entrent dans leur construction ou leur entretien;

Joints d'étanchéité fixes et mobiles.

Dans les *joints de résistance mobiles,* les surfaces en contact glissent ou roulent l'une sur l'autre.

Le déplacement par roulement est employé sur les plus vastes proportions, notamment dans l'industrie des transports : il suffira de rappeler les roues de véhicules de toute nature, brouettes, voitures, wagons de chemin de fer, etc. A s'en tenir au point de vue des mécaniciens, il n'est pas sans intérêt de signaler les améliorations énormes qui ont été réalisées dans ce mode de déplacement; les anciennes routes inégales, défoncées, raboteuses, ont été remplacées par des chaussées solides et unies, ou même par des rails en métal dur; les roues, jadis en bois, ont été munies de bandages en fer, puis, tout récemment, de bandages en caoutchouc, plein, creux ou soufflé. Grâce à ces perfectionnements, la résistance au roulement s'est trouvée successivement abaissée; elle est réduite aujourd'hui à des valeurs extrêmement petites.

Parmi les mécanismes dans lesquels intervient le roulement, l'un des plus répandus est la transmission funiculaire, par câbles ou courroies. Nous ne reviendrons pas sur l'étude que nous en avons faite.

Les joints de résistance mobiles par glissement sont extrêmement employés en mécanique. Ils constituent la partie essentielle de la plupart des mécanismes de transmissions, tels que les articulations, les supports d'arbres tournants, les glissières, rotules, vis, etc.

Si, avec des organes bien établis, la résistance au roulement devient presque négligeable, il est loin d'en être de même lorsque le frottement intervient. Le plus souvent, les frottements absorbent en pure perte une partie importante du travail développé par les moteurs : le rendement organique, c'est-à-dire la fraction réellement utilisée de la puissance motrice, est fréquemment assez faible; et même, dans beaucoup d'ateliers où les transmissions sont un peu développées, le rendement tombe à des valeurs presque dérisoires.

L'importance de cette question, qui domine, pour ainsi dire, toute la mécanique pratique, préoccupe depuis longtemps les ingénieurs et a fait l'objet de nombreuses et sérieuses recherches. Le progrès s'est fait pas à pas, mais il est important. Quand on essaye d'appliquer à l'un de nos ateliers modernes les méthodes de calcul et les coefficients dont on faisait usage il y a quelques années, on arrive à des résultats surprenants : on ne trouve sur les outils qu'un travail disponible insignifiant, ou même, plus souvent encore, la totalité du travail moteur est absorbée et au delà par les frottements, de sorte que, d'après les chiffres, la machine motrice serait hors d'état de traîner la

transmission complètement déchargée. Si ces conséquences sont absolument démenties par les faits de la pratique, c'est que la base même du calcul est erronée, c'est que les coefficients de frottement, qu'on appliquait très légitimement il y a quelque trente années, seraient absolument excessifs aujourd'hui, avec les méthodes de construction plus perfectionnées qui sont devenues d'un usage général.

Cette diminution dans la valeur des coefficients de frottement est due à la fois à un choix attentif des matériaux employés, soit pour constituer les surfaces frottantes, soit pour les lubrifier; il est dû aussi à une mise en œuvre plus parfaite de ces matériaux et aux dispositions judicieuses des organes.

Lorsque l'on a à traiter des frottements un peu importants, il est d'une pratique générale de les établir entre matières de duretés inégales; l'usure se reporte sur la pièce la moins dure, à laquelle on donne des dimensions assez faibles pour qu'il devienne facile de rattraper le jeu qu'elle peut prendre, et qu'il soit peu dispendieux de la remplacer lorsqu'elle est hors de service. La surface qui ne doit pas s'user est en fonte, en fer doux ou cémenté ou en acier, etc., suivant les cas. La surface qui s'use se fait souvent en bronze. Autrefois le bronze à canon, de composition à peu près constante, était presque seul employé pour cet objet. Des études approfondies ont permis d'approprier plus exactement la qualité du bronze aux conditions du service à faire; ces conditions sont, en effet, très diverses : il y a à considérer la pression et l'étendue des surfaces frottantes, la vitesse du glissement, sa continuité ou son intermittence, etc. En faisant varier la composition du bronze, on lui donne à volonté plus de douceur, de résistance, des frottements plus gras, etc.

On va même beaucoup plus loin dans cette voie, en introduisant dans le bronze, à côté des éléments constitutifs, d'autres matières, qui en modifient dans une large mesure les propriétés. C'est ainsi qu'à la suite des expériences de *MM. de Ruoltz* et *de Fontenay,* on a été amené à fabriquer les pièces de frottement en bronze phosphoreux, dont on peut, par un dosage approprié, faire varier, entre des limites éloignées, la dureté et la ténacité. Le bronze phosphoreux s'est rapidement répandu dans les usages de la mécanique, et il est employé aujourd'hui sur une grande échelle, principalement pour la confection des organes exposés à de fortes pressions et à une usure rapide.

D'autres corps ont été ajustés au bronze pour en modifier les propriétés : le manganèse, l'aluminium, etc.

Sous le nom général et assez peu précis de *métaux blancs,* on se sert aussi d'alliages divers, ne contenant pas de cuivre, du moins comme élément principal; ce sont des composés de métaux divers, plomb, étain, antimoine, zinc, etc., variables de nature et de composition. La plupart de ces alliages se ramollissent sous l'action d'une température assez peu élevée; de sorte que, dans le cas de chauffage des surfaces frottantes, ils s'étalent et répartissent la pression. On les associe fréquemment au bronze, sous forme de languettes ou de boutons incrustés dans la surface.

Dans quelques cas particuliers, on a recours aux bois durs : le gaïac, par exemple, est employé avec avantage pour le garnissage des pièces travaillant sous l'eau.

Les notions que nous possédons sur les propriétés des matières frottantes se développent et se précisent chaque jour ; toutefois il nous reste encore beaucoup à apprendre, et des expériences exactes et développées sur ce sujet important sont vivement à désirer.

Il va de soi que les surfaces entre lesquelles s'exerce le glissement doivent être exactement ajustées et polies, et s'appliquer rigoureusement l'une sur l'autre. Malgré cette précaution, le frottement à cru serait excessif; il est presque toujours nécessaire que les pièces soient abondamment lubrifiées. Pour cet objet, c'est aux corps gras que l'on a recours aujourd'hui d'une manière à peu près exclusive. L'eau sous pression, proposée jadis par Girard, et dont on voyait, à l'Esplanade des Invalides, une curieuse application, sous forme de chemin de fer glissant, est à peu près abandonnée.

Le choix du lubrifiant est loin d'être indifférent, et il doit varier suivant les circonstances. Les huiles fluides s'appliquent de préférence aux mouvements rapides; pour les fortes charges, on se sert d'huiles visqueuses, qui ne se laissent pas expulser par la pression; certaines huiles deviennent trop épaisses quand il fait froid ou trop coulantes par la chaleur; le même corps ne convient pas également pour graisser une tête de bielle et un tiroir. Il n'y a pas bien longtemps encore, les seuls corps gras employés comme lubrifiants étaient d'origine organique : pour les pièces fines, on se servait des huiles de pied de bœuf ou de pied de mouton; pour les gros organes, on employait les huiles végétales de colza, d'olive, de palme, le suif pour les pistons, etc. Souvent on mélangeait ces divers produits, on les additionnait de savon, de soude ou d'autres matières, suivant les circonstances et d'après des recettes variables d'un atelier à l'autre.

Pour l'usage dont il s'agit, les corps gras organiques présentent tous, à des degrés divers, un inconvénient grave : ils s'altèrent facilement. Au contact de l'air, surtout lorsqu'ils sont agités, ils absorbent l'oxygène, se résinifient, perdent leurs propriétés lubrifiantes et forment cambouis avec les parcelles de métal détachées par l'usure. La décomposition est beaucoup plus rapide lorsque la température s'élève; employés pour le graissage des pistons et des tiroirs, ces corps, sous l'action de la vapeur, dégagent des acides organiques, qui attaquent et corrodent profondément les pièces métalliques.

Un progrès considérable a été obtenu, dans ces derniers temps, par l'emploi des corps gras minéraux. Les grands avantages que présentent, comme lubrifiants, les corps gras d'origine minérale avaient été indiqués par *G.-A. Hirn;* les expériences aussi précises que concluantes faites par l'illustre mécanicien sur ce sujet important datent d'une trentaine d'années. Mais, à cette époque, les huiles minérales propres au graissage étaient assez rares, et les propositions de Hirn furent peu appréciées.

La situation est bien changée aujourd'hui; on a découvert, dans le sein de la terre, des gisements naturels de corps gras, qui furent considérés d'abord cemme une sorte de curiosité, puis exploités industriellement; de son côté, l'industrie des pétroles et

des huiles de schiste prenait de tous côtés des développements énormes; elle fabriquait, comme résidus de distillation, des produits qui convenaient parfaitement au graissage, et les livrait au commerce à des prix abordables. L'usage des corps gras minéraux s'est rapidement répandu et il en est fait aujourd'hui un large usage.

Ces corps possèdent des propriétés précieuses; la plus importante de toutes, c'est qu'ils sont à peu près inaltérables à l'air, à l'eau et à la vapeur. Par des traitements appropriés, on peut leur donner, presque à volonté, le degré de consistance ou de fluidité réclamé pour chaque emploi; on peut de même faire varier leur volatilité, qui est généralement très faible. L'huile minérale, après avoir servi au graissage, peut être recueillie, et, après purification, reprendre ses qualités primitives et être employée de nouveau.

En l'état actuel, les lubrifiants minéraux sont devenus d'un usage tout à fait général, on pourrait presque dire exclusif, pour le graissage des tiroirs et cylindres.

Pour le graissage à l'air libre, ils n'ont pas complètement remplacé les lubrifiants organiques, qui sont encore fort usités, soit seuls, soit mélangés au pétrole et à ses dérivés.

Les qualités que nous avons signalées ci-dessus n'appartiennent, cela va sans dire, qu'aux produits purs, convenablement préparés. Malheureusement, dans le commerce des huiles de graissage, la fraude s'est parfois introduite et a donné lieu à des déceptions, qui ont été mises sur le compte de la matière, au lieu de l'être au compte du vendeur. Ces sortes de falsifications ne sont pas toujours faciles à décéler; il y faut toutes les ressources d'un laboratoire bien monté et des manipulations délicates. Ce serait un grand et sérieux service à rendre à l'industrie, que de mettre à sa portée des moyens simples et pratiques de contrôler la pureté et les propriétés essentielles des huiles de graissage. Pour le présent, il est prudent de se défier des dénominations retentissantes et des prospectus trop alléchants; la marque d'une maison solide et honorable est encore la plus sûre et la meilleure des garanties.

La propriété que possède l'huile minérale d'être à peu près inaltérable a conduit à employer une méthode de graissage qui est fort remarquable par les résultats qu'elle a donnés. L'huile est envoyée en très grande surabondance; elle baigne largement tous les organes frottants, les débarrasse, par son passage, des boues, des poussières et de la chaleur qui a pu se dégager; le liquide lubrifiant est ensuite recueilli, décanté par le repos, filtré et, au besoin, refroidi; puis il est renvoyé au mécanisme à lubrifier, pour être employé de nouveau. Le circuit est complet, la quantité de matière consommée est, en définitive, minime, et se réduit à celle qui se perd par les fuites ou qu'il faut rejeter après altération par un long service. Ce procédé, qui, en somme, est avantageux et économique, tend à se répandre. Nous en avons vu précédemment de nombreux exemples; citons, entre autres, les applications faites par Parson's à son turbomoteur, par Westinghouse à sa machine à grande vitesse, par la maison Farcot à son usine élévatoire de Katatbeh, etc.

Le corps gras, quel qu'il soit, est plus commode à employer à l'état liquide qu'à l'état solide. Cependant pour le graissage des organes animés de grandes vitesses,

IMPRIMERIE NATIONALE.

l'huile présente un inconvénient sérieux; elle est projetée dans toutes les directions; non seulement elle se perd, mais elle souille tout ce qui se trouve dans le voisinage. Cet inconvénient se fait vivement sentir depuis que l'usage s'est répandu des machines à allures rapides. On y a paré quelquefois, comme nous l'avons vu ci-dessus, en enfermant tous les organes dans un coffre, qui reçoit les projections d'huile, les réunit et les ramène aux réservoirs à décantation. Mais cette solution n'est pas toujours admissible; il faut alors recourir à d'autres procédés.

A cet effet, on donne au corps gras une consistance pâteuse, et on l'oblige, par pression, à pénétrer entre les surfaces frottantes. Le système est fort à la mode, mais il y aurait peut-être quelques réserves à faire. Le lubrifiant, une fois qu'il a servi, ne peut plus guère être recueilli et doit être considéré comme perdu, ce qui n'est pas économique; en outre, la canalisation qui amène sous pression la graisse consistante jusqu'aux organes à graisser est souvent difficile à établir et à entretenir, à cause du mouvement même de ces organes.

Lorsqu'on a besoin de réduire autant que possible les résistances passives, on remplace le glissement par le roulement; à cet effet, entre les surfaces animées de mouvements relatifs, on interpose des pièces roulantes, rouleaux ou galets. C'est le procédé usité de tout temps pour le bardage des pierres de taille et autres pièces d'un poids élevé; on l'applique aussi, dans les chemins de fer, pour faciliter la manœuvre des plaques tournantes; on s'en sert pour soulager l'axe vertical des turbines, etc. Tout récemment ce procédé a pris une subite extension; c'est l'industrie des vélocipèdes qui lui a donné l'essor; les articulations de ces légères machines roulent dans des coussinets munis de billes en acier, et qui sont de vrais chefs-d'œuvre de construction mécanique. Des tentatives sérieuses sont faites de divers côtés, notamment en Amérique, pour appliquer le système en question à des mécanismes variés; il est difficile de pronostiquer aujourd'hui quel développement il est susceptible de prendre; mais il ne sera pas hors de propos de rappeler qu'il y a trente ans, les coussinets à billes étaient déjà l'objet d'un certain emploi. En 1861, à l'exposition de Metz, la maison Cambon, de Rozières-sur-Mouzon (Vosges), présentait une machine à battre avec manège vertical, le tout monté sur coussinets à billes; elle obtint un premier prix avec médaille d'or. Aux expositions locales qui eurent lieu dans le cours des années suivantes, la même maison remporta diverses récompenses. Elle présentait ce même dispositif à l'Exposition de 1889.

Nous avons actuellement à étudier la disposition des appareils qui servent à amener les lubrifiants aux surfaces frottantes. En décrivant les machines qui figuraient à l'Exposition, nous avons eu, à plus d'une reprise, l'occasion d'examiner les précautions auxquelles on a recours pour assurer le graissage. Nous n'avons pas à y revenir. Nous ne retiendrons ici que les appareils d'un usage général.

Commençons par ceux de ces appareils qui fonctionnent à l'air libre, tels qu'on les trouve appliqués sur les articulations des mécanismes ordinaires.

Lorsque les frottements sont peu étendus, le dispositif est fort simple : quelques gouttes d'huile introduites de temps à autre suffisent pour entretenir le graissage; on les verse à la main, à l'aide d'une burette; un petit canal amène le lubrifiant jusqu'au point à graisser.

Lorsqu'il s'agit, au contraire, d'articulations importantes, la question devient fort délicate; elle se complique encore, dans chaque cas particulier, de difficultés spéciales.

Étudions en premier lieu les appareils dans lesquels le corps lubrifiant est liquide. Le système ordinairement employé consiste à disposer, dans le voisinage de l'articulation, un réservoir pouvant contenir une provision d'huile suffisante pour quelques heures de marche. De là, le lubrifiant est conduit, par un petit canal, jusqu'au contact des surfaces à graisser.

Le réservoir est en métal ou mieux en verre, protégé au besoin par des armatures convenables. Le verre, par sa transparence, permet de voir si la provision d'huile est suffisante et quand il convient de la renouveler. L'huile est introduite, au moment voulu, par une ouverture pratiquée dans le haut. Lorsque le réservoir est monté sur une pièce en mouvement, l'ouverture est fermée par un couvercle hermétique, à vis ou à charnière, qui empêche les éclaboussures.

Le lubrifiant, amené au point à graisser, trouve des rainures divergentes ou *pattes d'oie,* qui aident à sa répartition. Le tracé et les formes de ces pattes d'oie ne sont pas sans importance; elles doivent étendre le corps gras aussi uniformément que possible et, en même temps, en éviter la déperdition inutile.

L'huile doit s'écouler goutte à goutte, au fur et à mesure du besoin, sans quoi le réservoir serait vidé en quelques instants, et l'huile absolument gaspillée. C'est là une des grosses difficultés du problème. Pour régler cet écoulement, qui doit toujours être minime, on emploie des procédés très variés; mais, il faut bien en convenir, ceux en usage jusqu'ici ne donnent pas entière satisfaction. L'un des moyens les plus répandus consiste à amener le liquide par siphonnement capillaire, au moyen d'une mèche, qui trempe par un bout dans le réservoir d'huile et dont l'autre bout arrive au centre de la patte d'oie; cette mèche est pincée par un fil métallique formant ressort; on modère l'écoulement en serrant plus ou moins ce fil.

Ce procédé est loin d'être parfait; le mode de réglage est grossier et incertain dans ses effets; la mèche et les conduits s'encrassent et cessent de débiter. On a cherché, par bien des moyens, à l'améliorer.

L'un des plus simples consiste à produire le débit par un orifice de très petite dimension, dont l'ouverture est réglée par un pointeau manœuvré à l'aide d'une vis; l'appareil est complété par un petit filtre, qui ne laisse arriver à l'orifice d'écoulement que de l'huile limpide.

On a proposé également de remplacer la mèche en laine ou en coton par de la

grenaille très fine de plomb ou de plombagine (système Verny, de Réaumont, Isère), à travers laquelle l'huile s'écoule lentement, par un effet de capillarité.

Ces dispositifs présentent un inconvénient commun : l'écoulement est indépendant de la vitesse du mécanisme; il se continue même au repos, c'est-à-dire qu'une partie de l'huile est inutilement gaspillée. Divers remèdes ont été imaginés; un des plus usités est le suivant : le canal d'écoulement est un tube droit presque entièrement rempli par une tige, qui cependant s'y meut librement; le débit a lieu par la section annulaire qui existe entre la tige et la paroi interne du tuyau; la viscosité de l'huile est suffisante pour que, au repos, tout écoulement cesse; l'écoulement reprend, au contraire, lorsque la tige est agitée dans son logement; cette tige repose, par son extrémité libre, sur la surface de la fusée à graisser; quand cette fusée tourne, elle communique à la tige un léger mouvement, qui assure un écoulement modéré.

Dans certains graisseurs, on a taillé la tige mobile en forme de vis.

Quel que soit le système employé, le réglage du débit se fait pour ainsi dire à l'aveuglette, on ne sait pas au juste combien d'huile on dépense, et par suite, de crainte d'insuffisance, on est toujours amené à en dépenser trop. Pour parer à cette difficulté, beaucoup de constructeurs disposent, sur le parcours du canal d'amenée de l'huile, un petit récipient muni de glaces transparentes, à travers lesquelles on voit l'huile s'écouler goutte à goutte. Le mouvement de ces gouttes donne une idée très nette de l'importance du débit et permet de régler celui-ci assez commodément.

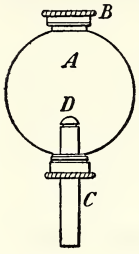


Fig. 245. Graisseur de la Coux.

Dans les graisseurs J. de la Coux, d'Asnières (Seine) [fig. 245], le comptage du débit se fait de la manière suivante : le réservoir d'huile *A*, en verre, est hermétiquement clos par un bouchon en bronze *B*; le canal *C* pénètre dans le chapeau du coussinet presque jusqu'au contact de la fusée, et s'élève dans le réservoir; il est couronné par une calotte *D* percée d'une petite ouverture; l'écoulement ne peut se produire sans que le vide tende à se faire dans le réservoir; ce vide est comblé par l'air atmosphérique, qui s'introduit bulle à bulle par le trou *D*, ce qui permet de se rendre compte du débit.

Il arrive fréquemment que l'accès des réservoirs d'huile n'est pas commode ni sans danger; c'est surtout le cas des machines à grande vitesse, qui sont aujourd'hui en faveur; on n'est pas libre, d'ailleurs, de disposer de réservoirs assez volumineux pour suffire à une marche un peu prolongée.

Lorsque l'articulation à graisser comporte des pièces fixes, comme les paliers d'un arbre de couche ou les glissières d'une tête de piston, il est facile d'amener l'huile à l'aide de petits tuyaux convenablement contournés.

Mais quand tous les organes sont en mouvement, comme dans le cas d'une tête de bielle, la chose devient plus difficile. On a alors recours à divers artifices, plus ou moins ingénieux : tuyaux flexibles, tuyaux articulés, tuyaux coulissants, dits *trombones*,

lécheurs, etc.; quelquefois, pour les pièces tournantes, on utilise la force centrifuge, ainsi que nous en avons vu un exemple dans la petite machine rapide d'Escher Wyss et Cie.

Ce graissage à distance est propre, commode et économique; dans quelques machines établies avec des soins particuliers, on a systématisé le procédé. Toutes les conduites d'huile viennent aboutir à un seul réservoir de grand volume; en tête de chaque conduite se trouve l'appareil de réglage du débit. Ces appareils forment ainsi un clavier, qui est sous les yeux et à la main du mécanicien; des étiquettes indiquent la destination de chaque canal, et des compte-gouttes complètent les renseignements utiles pour la conduite de la machine.

Si le graissage est déjà une opération délicate lorsqu'il s'agit de machines ordinaires, les difficultés s'accroissent dans une proportion énorme lorsque les organes à graisser sont d'un accès difficile ou dangereux, lorsqu'il est impossible d'y mettre la main pour remplacer le lubrifiant usé. Tel est le cas, entre beaucoup d'autres, des fusées des wagons de chemin de fer; tel est également le cas, pour ne pas sortir des limites de la classe 52, de ces arbres de transmission qui courent le long des ateliers, sur des distances considérables, en distribuant sur leur parcours la puissance motrice à d'innombrables machines-outils. Ces arbres sont soutenus, à des distances rapprochées, par des paliers dans lesquels ils tournent, et dont l'accès est interdit, sous peine d'accidents affreux, tant que l'atelier est en marche. Les méthodes de graissage que nous avons examinées jusqu'à présent seraient ici inapplicables; on a dû chercher d'autres procédés. Ceux auxquels on s'est généralement arrêté dérivent d'un même principe, qui a été indiqué plus haut : graisser en surabondance, recueillir l'huile après qu'elle a servi, la purifier et la faire servir de nouveau. Le système devient tout à fait pratique lorsqu'on dispose d'huiles peu altérables, comme les bonnes huiles minérales; nous en avons déjà signalé quelques applications importantes à des machines motrices. Mais lorsqu'il s'agit d'arbres de transmission, il faut des dispositifs à la fois plus simples, plus rustiques et moins coûteux.

D'après ce qui vient d'être dit, on voit qu'un palier à graissage continu se compose de quatre parties essentielles : le graisseur proprement dit, la canalisation qui recueille l'huile en excès, le réservoir où cette huile se réunit et se purifie, et enfin le dispositif qui sert à ramener l'huile purifiée à l'appareil graisseur.

La première partie, le graisseur, ne diffère pas des systèmes ordinaires; il comporte des coussinets avec rattrapage de jeu, et des pattes d'oie servant à répartir l'huile sur toute la surface frottante.

Il importe que cette huile, qui doit repasser un grand nombre de fois par les mêmes organes, ne puisse s'épancher au dehors, et qu'il s'en perde le moins possible; les dispositifs qui ont pour objet de la réunir sont constitués de différentes manières : ce sont des anneaux de feutre, de fibre, de cuir ou de métal, placés de part et d'autre de la surface frottante; elles embrassent légèrement la fusée et jouent dans des rainures

normales à l'arbre, et pratiquées soit dans les coussinets, soit dans les paliers. Ces garnitures ont aussi pour effet d'empêcher les poussières de pénétrer dans l'appareil. Elles essuient la surface lubrifiée et en ramassent le liquide, qui est conduit par les rainures jusqu'à un réservoir inférieur.

C'est dans ce réservoir que le liquide se décante; quelquefois aussi la purification en est complétée par filtration. Il est naturellement placé au-dessous des organes à lubrifier; il faut donc remonter l'huile pour compléter le circuit.

Le remontage de l'huile se fait quelquefois à l'aide d'organes en mouvement, par exemple un disque ou un anneau, ou bien des galets en bois ou en métal, trempant par le bas dans le réservoir, et que l'arbre à graisser fait tourner avec lui; mais ce procédé a l'inconvénient d'agiter l'huile et de troubler la décantation; plus souvent on a recours à des corps poreux ou fibreux, mèches en coton, en laine ou en chanvre, éponge, brosses, velours, tiges de rotin, etc., qui élèvent le liquide par un effet de capillarité; il faut d'ailleurs éviter que ces corps ne s'engorgent, ce qui ne tarde pas à se produire quand l'huile vient à s'altérer ou que les poussières pénètrent entre les coussinets. La maison Piat, de Paris, se sert, pour élever l'huile, de mèches métalliques (fig. 246); ces mèches sont constituées par une mince feuille de métal repliée sur elle-même un grand nombre de fois, à la façon d'un éventail, et taillée sur sa tranche suivant le contour de l'arbre, qu'elle touche très légèrement. La figure 247 représente les chaises de transmission construites par la même maison : on remarquera la grande longueur donnée à la surface frottante, ainsi que la facilité donnée aux coussinets de tourner autour d'un axe vertical, pour obéir aux petites déviations que peut prendre l'arbre de transmission; les coussinets sont souvent en fonte douce. Ces dispositions dérivent en partie de celles qui ont été mises en faveur par l'illustre ingénieur américain Sellers.

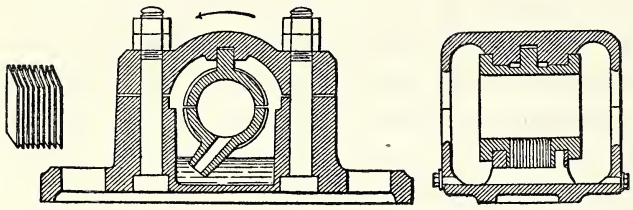


Fig. 246. — Graisseur Piat.

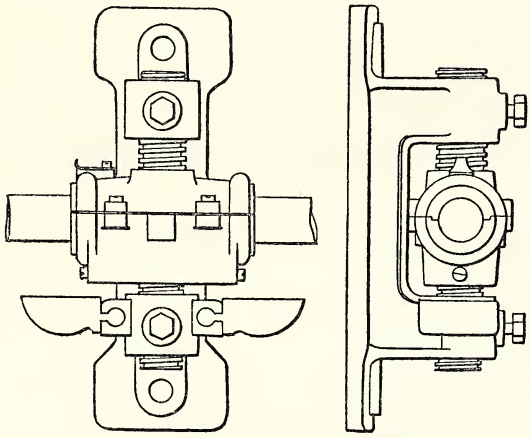


Fig. 247. — Chaise de transmission Piat.

Lorsque, au lieu d'huile, on se sert pour lubrifier de graisse consistante, il faut exercer une pression pour obliger le corps gras à pénétrer entre les surfaces.

La figure 248 représente le graisseur Stauffer, qui est fort employé; on produit

la pression en vissant le réservoir sur le piston qui en forme le fond mobile. Dans certains modèles, la pression est donnée par un ressort à tension variable, ou bien par la force centrifuge, lorsque le graisseur est monté sur un organe à rotation rapide.

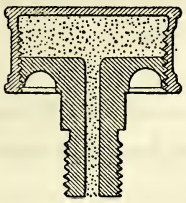


Fig. 248.
Graisseur Stauffer.

Le graisseur Leneveu, construit par M. Bourdon, de Paris, a pour objet d'assurer le graissage des têtes de bielle : le mouvement alternatif de la bielle fait osciller un petit pendule, qui actionne, par encliquetage et engrenage, un piston pressant sur la graisse consistante. Ce système a l'avantage de ne dépenser que lorsque la machine est en marche et proportionnellement à sa vitesse; il n'exige aucune de ces canalisations de lubrifiant, qui sont si compliquées et si difficiles à tenir en bon état.

Parmi les maisons qui exposaient des graisseurs à graisse consistante, on peut citer MM. Wanner et Cie, M. Hamelle (Henry), de Paris, M. Degrémont-Samaden, du Cateau (Nord), etc.

Les dispositifs employés pour graisser les articulations qui fonctionnent en plein air ne sauraient servir quand il s'agit d'organes travaillant dans un fluide sous pression, comme les tiroirs et les pistons; la pression chasserait le lubrifiant. On a recours, suivant les cas, à des procédés variés.

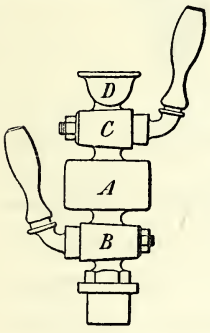


Fig. 249.
Graisseur sous pression.

La figure 249 représente un des appareils usités pour cet objet : un réservoir A, destiné à contenir le lubrifiant, est compris entre deux robinets; l'un B établit la communication avec l'organe à lubrifier, l'autre C est surmonté d'un petit entonnoir D, et sert à introduire l'huile dans le réservoir A. La manœuvre est simple : B étant fermé, on ouvre C et on remplit le réservoir A, puis on ferme C, on ouvre B et le liquide tombe dans l'espace à graisser. L'appareil fonctionne comme une véritable écluse à sas. Il est fort en usage, surtout pour les machines à vapeur de médiocre dimension, mais il est loin d'être économique; l'huile contenue dans le réservoir est projetée en masse au moment où s'ouvre le robinet B; elle se répartit imparfaitement, et est en grande partie entraînée, sans effet utile, par les mouvements de la vapeur à l'échappement.

Dans certains modèles, les robinets à boisseau sont remplacés par des robinets à vis; la figure 250 représente un graisseur du système *Pearson,* construit par la maison Muller et Roger, de Paris; la fermeture supérieure du réservoir d'huile A se fait par le pointeau B, manœuvré par le volant C; le bas du réservoir est fermé par la boule D, au moyen du volant E; la manœuvre de ce volant permet, dans une certaine mesure, de modérer par étranglement le débit de l'huile. De petits canaux a et b facilitent l'évacuation de l'air et de la vapeur et régularisent l'écoulement.

Dans le graisseur Coux (Jules de la), d'Asnières, près Paris (fig. 251), le réservoir est en cristal, soutenu par une forte armature en bronze; un pointeau conique règle le débit; un compte-gouttes est établi sur le parcours de l'huile.

Les robinets à pointeau permettent de régler avec précision la section de l'orifice d'écoulement et de la réduire à des proportions minimes; ils apportent donc une amé-

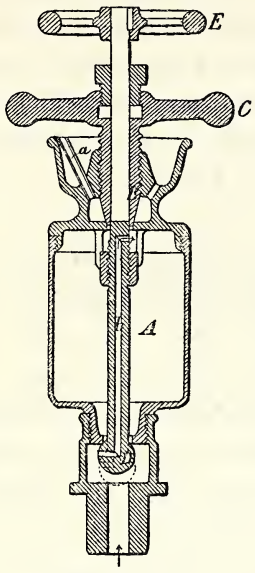


Fig. 250.
Graisseur Pearson.

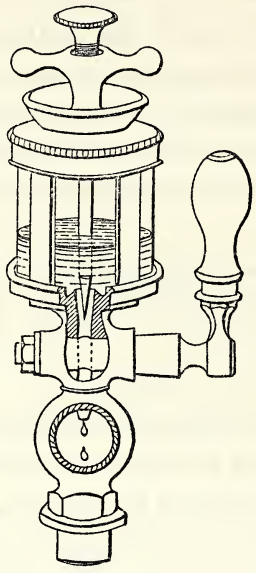


Fig. 251.
Graisseur Coux.

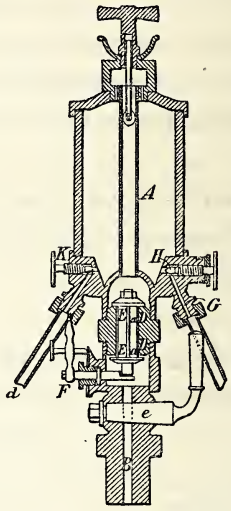


Fig. 252.
Graisseur Meuse.

lioration importante au jeu des graisseurs primitifs munis de robinets à boisseau. Néanmoins, la perte d'huile est encore notable; surtout lorsque ces appareils sont montés sur un cylindre, dans lequel la pression subit des variations étendues : au moment de l'admission, l'équilibre de pression s'établit entre le cylindre et le réservoir d'huile, lequel reçoit une charge de vapeur et d'eau chaude; pendant la détente et surtout l'échappement, la pression baisse rapidement dans le cylindre; l'écoulement se produit alors en vertu d'une différence de pression considérable; il est donc fort abondant, si petit que soit l'orifice.

Le système imaginé par M. J. Mense (fig. 252) et exposé par M. Petit de Meurville, de Bordeaux, a pour objet de tourner cette difficulté. Le réservoir *A* communique avec le canal de graissage *B* par un orifice *DD*, à travers lequel passe la tige épaisse d'une soupape à double siège *EE*; cette tige remplit sans frottement le logement qu'elle occupe; une petite rainure *aa* est creusée sur une de ses arêtes pour le passage de l'huile. On conçoit tout de suite le jeu de l'appareil : la double soupape, obéissant aux variations de la pression, s'applique alternativement sur l'un ou l'autre de ces deux sièges; à chaque oscillation, une petite quantité d'huile, correspondant à une fraction

du volume de la rainure *aa*, descend du réservoir *A* dans le cylindre. Si, à un moment donné, on veut graisser plus abondamment, il suffit, au moyen de la clef *F*, de soutenir la double soupape, de manière à maintenir l'écoulement constant. L'appareil figuré ci-contre est fait pour le service d'une machine sans condensation; le réservoir, fermé par le haut, communique, par le tube *G*, avec la conduite d'amenée de vapeur; cette communication est réglée par le pointeau *H*; le bas du réservoir se remplit ainsi d'eau condensée, et la pression dans ce réservoir est un peu inférieure à celle de l'admission; le robinet *K* sert à évacuer l'eau quand on veut remplir le réservoir. Pour les machines à condensation, les robinets *K* et *H* sont supprimés et le réservoir communique directement avec l'atmosphère.

Pour le graissage des organes intérieurs des machines à vapeur, on a recours, depuis quelques années, à un procédé qui, dans bien des cas, s'est montré tout à fait efficace. Au lieu d'amener le lubrifiant sur les surfaces frottantes, on le verse goutte à goutte dans la conduite d'amenée de vapeur, en un point rapproché de la boîte de distribution, et, autant que possible, dans un courant de vapeur un peu rapide. Les gouttes d'huile sont saisies par ce courant et pulvérisées; le liquide gras se mêle intimement avec la vapeur, qui l'entraîne avec elle, le dépose, mélangé d'eau condensée, sur toutes les surfaces qu'elle rencontre, et les enduit d'une couche graisseuse éminemment lubrifiante. Parmi les avantages du système, il en est un qui n'est pas sans importance; c'est que le réservoir d'huile peut être placé n'importe où, même à une assez grande distance du cylindre, auquel il est relié par un simple tuyau livrant passage à l'huile.

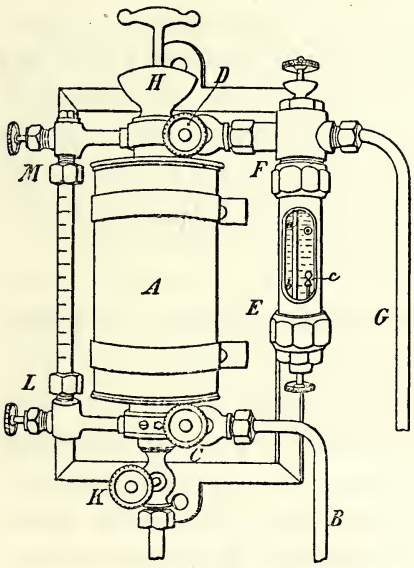


Fig. 253. — Graisseur sous pression avec compte-gouttes Hamelle.

Ce dispositif a été appliqué tout d'abord aux machines marines : l'exiguïté des espaces disponibles sur les navires rendait particulièrement précieuse cette facilité de graisser à distance. De là, il s'est rapidement répandu dans l'industrie et a fait l'objet de perfectionnements notables.

La figure 253 représente l'une des formes que l'on donne à ces sortes d'appareils. Le réservoir d'huile *A* communique avec la conduite de vapeur par le tuyau *B*, qui lui amène de l'eau condensée, le débit de cette eau est réglé par le pointeau *C*; l'eau, plus dense, déplace progressivement l'huile en la repoussant vers le haut du réservoir; le pointeau *D* règle l'écoulement de cette huile; elle est reprise par le tube courbé *abc*, qui se termine en *c* par une pointe, débouchant dans le tube en cristal *EF*, lequel est plein d'eau; l'huile s'écoule goutte à goutte, en remontant à

travers cette eau, ce qui permet de contrôler l'importance du débit; elle s'accumule dans le haut du tube et enfin elle est conduite par le tuyau *G* jusqu'à la boîte de distribution. Un entonnoir *H* avec bouchon à vis et un robinet de purge *K* permettent de renouveler la provision d'huile; le tube de niveau *LM* indique à chaque instant le volume d'huile existant dans le réservoir. L'appareil ainsi agencé est construit par M. Hamelle (Henry), de Paris.

Sans s'écarter notablement du principe, on donne à ces graisseurs des dispositions fort variées. M. E. Bourdon, de Paris, la Crosby steam gage and valve C°, de Boston, Mass. (États-Unis), et d'autres constructeurs présentaient des graisseurs de ce système fort bien établis; un grand nombre de ces appareils étaient en service sur les moteurs à vapeur de l'Exposition.

M. Lalance, de Paris, expose un graisseur pour locomotives, imaginé par M. Schober, et ayant pour objet de parer à certaines difficultés qui se rencontrent dans la conduite de ces machines. Dans les pentes un peu longues, on marche à régulateur fermé; les pistons et tiroirs, mal graissés, sont alors exposés à gripper. Le graisseur Schober (fig. 254), qui se monte sur le cylindre, se compose d'un réservoir d'huile *A*, séparé par une cloison d'un réservoir inférieur *B*, dans lequel le liquide est versé goutte à goutte par la mèche en coton *C*; la communication avec le cylindre est formée par deux soupapes *D*, *E*, soutenues par de très légers ressorts. Ces soupapes sont fermées par la pression lorsque le piston travaille; mais dès que le régulateur est fermé, elles se trouvent à peu près en équilibre et sous l'action des secousses et des légères variations de pression qui se produisent dans le cylindre, elles entrent en vibration et versent l'huile contenue en *B*.

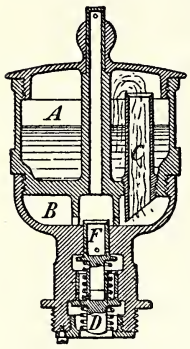


Fig. 254.
Graisseur Schober.

Un autre procédé de graissage des cylindres, fort simple en principe, est aujourd'hui très répandu : le lubrifiant, liquide ou semi-liquide, est contenu dans un cylindre, sur lequel presse un piston; une transmission, cliquet, vis, ou engrenage, reliée à l'un quelconque des organes de la machine, imprime à ce piston un mouvement très lent de descente; le lubrifiant ainsi expulsé est amené par un tuyau au point convenable. Plusieurs des moteurs de l'Exposition comportaient des graisseurs de ce système; un grand nombre de maisons les livrent à l'industrie; citons, entre autres, M. Lusert, de Lyon, M. Drevdal, de Paris, M. Felon (Joseph), de Liège, MM. Hubert (Philippe) et Cie, de Budapest, etc.

Lorsque le graissage est défectueux, les surfaces frottantes s'échauffent d'abord, puis s'entament et grippent; c'est là un accident assez fréquent et dont les conséquences sont toujours fâcheuses; il entraîne des réparations et, par suite, des chômages coû-

teux. Il serait très utile d'être prévenu assez à temps pour empêcher que le grippement ne se produise. C'est le problème que s'est posé M. Raffard, de Paris.

Sur l'organe exposé à s'échauffer, et aussi près que possible de la surface frottante, il soude, à l'aide d'une pastille en métal fusible, un appareil de déclenchement; dès que l'échauffement a lieu, la pastille fond, le déclenchement se produit et fait retentir une sonnette électrique ou tout autre signal d'alarme.

Dans la construction des machines, on a constamment à constituer des récipients étanches, c'est-à-dire susceptibles de contenir sans fuite des fluides sous pression; les parois de ces récipients sont formées de parties solides réunies par des joints, et l'une des grandes difficultés du problème consiste à rendre ces joints étanches.

Les circonstances qui peuvent influer sur la constitution des joints sont extrêmement nombreuses et variées : le fluide à contenir peut être liquide, gazeux ou à l'état de vapeur; certains de ces fluides exercent une action corrosive; les dispositions qui conviennent pour les basses pressions deviennent insuffisantes pour les pressions élevées; la température du fluide joue un rôle de premier ordre; enfin, dans certains cas, les parties jointes n'ont pas de mouvement relatif et le joint est fixe; dans d'autres cas, au contraire, le joint est glissant.

Nous examinerons en premier lieu ce qui concerne les joints fixes.

Entre surfaces métalliques convenablement dressées, on peut faire d'excellents joints à cru, par simple appui et sans l'interposition d'aucune matière. Rappelons quelques exemples bien connus : les clapets d'arrêt, prises de vapeur, robinets-vannes, robinets à boisseau ou à pointeau sont établis d'après ce principe; il en est de même des tubes Berendorf, des assemblages de certaines chaudières à petits éléments, etc.

Le simple contact entre surfaces bien rodées suffit, dans certains cas, pour assurer l'étanchéité sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir une pression notable; c'est ainsi qu'une soupape de sûreté en bon état reste étanche jusqu'au moment où elle se soulève.

Pour tenir les pressions très élevées, M. E. Bourdon, de Paris, emploie un pointeau à bout sphérique, qui se coince dans un cône creux.

Quand les surfaces sont imparfaitement dressées, on fait souvent le joint en refoulant la matière de l'un des organes à joindre, pour qu'elle s'imprime sur l'autre organe; les joints des chaudières sont étanchés par le matage ou le sertissage.

Le plus souvent, entre les surfaces, on interpose une matière plastique, qui se moule par l'effet du serrage; tel est l'usage du caoutchouc, du cuir, pour les joints à froid; pour les joints à chaud, on se sert couramment de mastic de céruse ou de minium; on fait aussi usage d'amiante pure ou caoutchoutée, de fils ou bagues de plomb ou de cuivre; pour faciliter l'emploi, ces matières sont quelquefois mélangées de tissu ou enfermées dans des gaines en tissu végétal ou métallique.

Nous avons déjà vu quelques exemples de ces sortes de joints en parlant des conduites de vapeur. Lorsque l'on a affaire à des fluides froids sous de très hautes pressions, telles que celles en usage dans les transmissions par l'eau comprimée, la gutta-percha est usitée pour faire les joints des conduites.

La question est beaucoup plus compliquée lorsqu'il s'agit de joints glissants tels que ceux des tiroirs sur leur glace, des pistons sur les parois des cylindres, des tiges de piston dans leur garniture, etc. Voici, résumée rapidement, la technique actuellement en usage pour la confection de ces joints.

Pour les liquides sous faible pression, le joint se fait souvent à cru entre surfaces dressées. On emploie également le joint cru pour la vapeur, mais il exige alors un graissage abondant, sans quoi le grippement ne tarde pas à se produire et les fuites sont inévitables; c'est le mode employé pour les tiroirs et pour les segments de piston. La vapeur saturée et grasse se prête d'ailleurs fort bien à la bonne tenue des joints par suite de l'humidité qui se dépose sur les surfaces.

Comme exemple de joints à cru pour vapeur, rappelons le dispositif qui remplace le presse-étoupe dans la machine exposée par la Straight line engine C°, de Syracuse, N. Y. (États-Unis) : la tige du piston traverse le fond du cylindre par un trou, prolongé par un long fourreau bien graissé; la longueur du contact suffit pour assurer l'étanchéité.

Pour les fortes pressions et à froid, le cuir embouti de Bramah donne des joints très étanches; c'est cette disposition de joints que l'on rencontre ordinairement dans les presses hydrauliques; on en a fait usage également pour la manœuvre des freins continus sur les chemins de fer, dans certaines machines à air, etc.

Signalons, dans un ordre d'idées un peu différent, le joint tout spécial qui, dans certaines machines à froid, remplace le presse-étoupe pour contenir du gaz ammoniac fortement comprimé : il est formé d'huile de pétrole refroidie par une circulation de fluide à très basse température; cette huile, neutre et inattaquable par l'ammoniaque, prend, sous l'action du froid, une consistance pâteuse; la tige du piston, plus chaude, produit au contact un ramollissement local, ce qui donne un frottement très doux.

Souvent entre les surfaces glissantes, on interpose des matières plastiques ou filamenteuses, qui s'appuient en vertu de leur élasticité sur les deux surfaces. Sur ce principe est fondé l'organe si répandu qu'on appelle *presse-étoupe;* il est employé pour assurer l'étanche au passage d'une tige traversant une paroi, et s'applique également au cas de l'air, des liquides et de la vapeur. Le plus souvent, le garnissage est fait en tresses de chanvre ou de coton.

M. Wanner, de Paris, propose des garnitures en feuilles de papier buvard, enroulées cylindriquement autour de la tige; sous la pression du chapeau, ces feuilles s'écrasent et se plissent, en formant autour de la tige des canaux qui se remplissent d'huile et d'eau condensée.

La corde d'amiante est également usitée pour cet objet; on emploie l'amiante, soit pure, soit mélangée de chanvre, ou additionnée de talc, qui donne de la douceur aux frottements.

Les garnitures de presse-étoupe exigent un entretien soigné et assez minutieux. Depuis quelques années, on s'est efforcé d'atténuer cette sujétion par divers procédés; l'un des plus répandus consiste à faire le bourrage à l'aide de divers métaux, et, dans cette direction, on a obtenu des résultats intéressants. Dans certains appareils, le métal est coulé sous forme de grenaille fine, et versé dans une coupe, que traverse la tige du piston; l'étanchéité est donnée par l'huile qui est mélangée à la grenaille.

MM. Duval et fils, de Paris, font les garnitures de presse-étoupe en fil de laiton très fin et tressé.

Le système de garniture imaginé par M. L. Pile, de Paris, est fort répandu. La figure 255 en représente un spécimen. Le chapeau *AA* du presse-étoupe est fixé à demeure, formant joint sur la coupe *BB*; la garniture est constituée par des bagues *CC* en métal blanc, lequel se ramollit à la température de la vapeur; ces bagues sont en deux pièces, pour faciliter le montage; le serrage est donné par un fourreau *DD*, appuyé par le ressort à boudin *EE*, lequel bute contre le grain en bronze *FF*. Ces garnitures peuvent fonctionner plusieurs mois, sans qu'il soit nécessaire d'y retoucher. Pour les recharger, on démonte le chapeau et on ajoute une ou deux bagues en métal blanc.

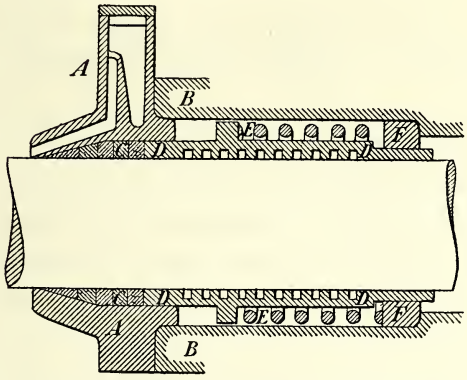


Fig. 255. — Garniture L. Pile pour presse-étoupe.

Des dispositifs analogues sont appliqués par plusieurs maisons; nous citerons, entre autres, la United States metallic packing C°, de Philadelphie, dont les garnitures sont employées par un grand nombre de constructeurs et de Compagnies de chemins de fer.

CHAPITRE IX.

MACHINES SERVANT À LA MANŒUVRE DES FARDEAUX.

SOMMAIRE.

Objet et division.

Appareils de levage à bras. — Généralités. — Crics et vérins. — Vérins hydrauliques. — Appareils funiculaires : liens à section uniforme, treuils, cabestans, poulies, palans. — Liens à engrenage, de Vaucanson, de Galle, de Neustadt, chaîne calibrée. — Palan différentiel. — Expositions de Foccroulle (Jules), de Foccroulle (Charles), de veuve Bernier, de Decauville, de Verlinde, de Mabille; chaînes d'Augé.

Appareils de levage mus par puissance mécanique. — Appareils avec machines et chaudière. — Appareils mus par transmission. — Expositions de Voruz, de Caillard, de Sautter et Lemonnier, de Bon et Lustremant, de Fives-Lille, de Guyenet, de Hunter et English, de l'*Hydraulic Engineering C°*.

Ascenseurs et monte-charges. — Généralités. — Système Edoux; système à chaîne mouflée; systèmes divers. — Ascenseurs de l'Exposition. — Ascenseurs de Samain, de l'*Hydraulic Engineering C°*. — Ascenseurs de la tour Eiffel. — Ascenseurs de la tour Eiffel, de Roux, Combaluzier et Lepape, d'Otis, d'Edoux.

Ponts roulants de Bon et Lustremant, de Mégy, Écheverria et Bazan.

Grue de Guyenet pour le montage de la tour Eiffel.

Parmi les opérations que les hommes ont à exécuter chaque jour, il en est peu qui soient plus nécessaires que le déplacement des fardeaux, il n'en est guère qui se renouvellent plus fréquemment et dans des conditions plus variées. Prendre un objet en un point où il ne peut servir, le transporter au point où il doit être utilisé, c'est, pour ainsi dire, la manœuvre universelle; c'est celle qu'exécutent, sur une échelle plus ou moins vaste, aussi bien l'enfant qui porte son pain à sa bouche, que l'aide-maçon qui apporte à pied d'œuvre le moellon et le mortier, que le général qui amène son armée sur le champ de bataille; c'est cette manœuvre qui fait l'objet essentiel des industries les plus importantes, les chemins de fer, la navigation, etc. C'est en facilitant et en rendant rapides et économiques les transports sous toutes leurs formes, que la mécanique a produit la vaste révolution sociale à laquelle a présidé le siècle actuel.

Cette question des transports est d'une étendue immense. De ce vaste domaine, nous n'avons à explorer qu'un coin très restreint et très modeste. Nous étudierons seulement les appareils mécaniques qui servent à déplacer les fardeaux sur un espace de peu d'étendue; nous écartons, en outre, tous ceux de ces appareils qui se rapportent à une industrie spéciale, et qui, par suite, ne rentrent pas dans le ressort de la mécanique générale.

Sans même sortir de ces limites étroites, nous avons à considérer des appareils très variés, aussi bien comme destination que comme dispositions. Une classification s'impose pour cette étude; mais il est difficile de l'établir claire et rationnelle.

En cherchant simplement à grouper entre eux les appareils qui se rapprochent par quelque analogie, nous sommes arrivé à la classification ci-après :

Appareils de levage à bras;

Appareils de levage mus par puissance mécanique;
Ascenseurs et monte-charges;
Appareils divers, ponts et treuils roulants, machines à mâter, etc.

Les appareils de levage à bras les plus usités sont : le levier, le cric, le vérin, les systèmes funiculaires et les systèmes composés, tels que les treuils et les grues. Tous ces appareils sont extrêmement répandus; beaucoup de maisons les fabriquent de façon satisfaisante comme produits de vente courante.

Ce n'est pas à dire pour cela que l'on ne rencontre souvent de ces appareils assez médiocrement établis et qui, à l'usage, donnent de sérieux mécomptes. Ils devraient, en effet, remplir certaines conditions, assez simples par elles-mêmes, mais dont le constructeur omet parfois de tenir compte.

Les machines de levage à bras ne sont, en somme, autre chose que des transmissions mécaniques, recevant d'un côté l'effort des bras de l'ouvrier et de l'autre l'action de la résistance à surmonter. Si l'on fait abstraction des frottements et que l'on considère, d'autre part, que le mouvement de tous les organes est assez lent pour qu'on puisse négliger les effets de l'inertie, on voit qu'on se trouve dans le cas d'un système à liaisons, en équilibre sous l'action de deux forces : la puissance et la résistance. Le travail recueilli à chaque instant est donc, dans les hypothèses où nous nous sommes placés, précisément égal au travail dépensé; c'est dire que la vitesse imprimée à la charge sera, toutes choses égales, d'autant plus petite que cette charge sera plus forte. D'autre part, l'effort musculaire, ainsi que le travail par seconde que peut développer un homme, sont tenus dans des limites étroites. Il importe que la machine soit étudiée de façon à permettre à l'ouvrier de développer travail et effort dans les meilleures conditions possible.

Nous avons, comme premier jet, négligé les frottements. Il est indispensable d'en tenir compte; mais la question est importante et nous aurons occasion d'y revenir.

On ne doit pas oublier que les machines dont il s'agit sont destinées à être confiées fréquemment à des mains grossières ou inattentives; elles ont donc besoin d'être robustes, résistantes, et cependant, le plus souvent, il faut qu'elles soient assez légères pour être transportées et installées à bras. Leur manœuvre doit être simple et à la portée d'ouvriers ordinaires. Enfin, condition essentielle, elles doivent offrir une sécurité telle que, même par une maladresse, elles ne puissent pas causer d'accident.

Les crics, ces outils si usités sur tous les chantiers, se font de diverses manières. Dans les plus simples, l'organe principal est une barre de métal, portant en haut et en bas des appendices, qui s'engagent sous les pièces à soulever; cette barre, guidée par des galets, est taillée dans sa partie moyenne en forme de crémaillère, et reçoit, par l'intermédiaire d'un pignon et d'un train d'engrenage, l'action d'une manivelle manœuvrée à la main. Le dévirage est contretenu par un cliquet, mordant sur une roue

à rochet montée sur l'un des arbres du train d'engrenage. Tout le mécanisme est enfermé dans une solide boîte en bois ou en métal, laquelle porte un talon pour appui sur le sol et des anneaux pour le transport de l'outil. Ainsi constitué, le cric répond à la plupart des conditions auxquelles doit satisfaire un instrument de cette nature. Il possède de plus une propriété sur laquelle il convient d'insister : les frottements sont faibles et, par suite, le rendement mécanique est élevé, c'est-à-dire que le travail communiqué à la manivelle est transformé, sans déchet trop notable, en travail utile d'élévation de la charge. Cette qualité, que l'on recherche avec soin dans la plupart des mécanismes, présente peut-être, au cas actuel, plus d'inconvénients que d'avantages. Sans doute il est vrai que, pour élever une charge donnée, la quantité de travail à dépenser est aussi réduite que possible; mais, d'un autre côté, si, par fausse manœuvre ou autrement, le cliquet vient à manquer, l'appareil dévire, la charge retombe de tout son poids, en lançant la manivelle à toute vitesse, et des accidents sérieux peuvent en résulter.

Examinons ce point d'un peu plus près, car il domine toute la question des appareils de levage.

Pour empêcher une charge, une fois soulevée, de s'affaler brusquement, on a recours à des cliquets ou à des freins. Les freins sont préférables comme douceur de fonctionnement et comme sécurité; leur action est moins brutale et ne donne pas lieu à des chocs. C'est par frottement qu'ils agissent. Dans beaucoup d'appareils de levage, surtout lorsqu'il s'agit de charges un peu fortes, les frottements intérieurs du mécanisme sont assez considérables pour former un frein suffisant; dans ces sortes de machines, lorsqu'on cesse d'agir sur la manivelle, la charge reste suspendue, l'appareil n'a aucune tendance à dévirer; pour faire redescendre la charge, il faut agir sur la manivelle en sens inverse du mouvement qui donne l'ascension. Toute descente involontaire se trouve ainsi conjurée. C'est là une propriété qui est précieuse au point de vue de la sécurité. D'autre part, ces frottements importants, qui se produisent à la montée aussi bien qu'à la descente, absorbent beaucoup de travail; il est facile de se rendre compte qu'en pareil cas le rendement est nécessairement inférieur à 50 p. 100; en pratique, il descend d'ordinaire bien au-dessous de ce chiffre.

Parmi les appareils rentrant dans cette catégorie, l'un des exemples les plus nets est le vérin : le vérin, comme on sait, est une vis dont la tête pivotante porte directement la charge à soulever, et qui glisse dans un écrou fixe; on fait tourner la vis à l'aide d'un tourne-à-gauche mû par un levier; en déterminant convenablement les proportions de la vis et du levier, on peut produire des efforts considérables; il va de soi d'ailleurs que l'élévation est d'autant plus lente que l'appareil est plus puissant.

L'effort résultant de la charge se transmet, par la tête pivotante, à la vis et aux filets de l'écrou; de là, des pressions énergiques sur le pivot et les filets, pressions qui se traduisent par des frottements s'opposant au mouvement de rotation de la vis. Avec les proportions ordinaires données à cette machine, un homme peut soulever un poids

IMPRIMERIE NATIONALE.

de plusieurs tonnes, et la charge reste suspendue sans l'intervention d'aucun cliquet; mais l'effet utile atteint rarement 25 p. 100. Pour affaler la charge, il faut dévirer au tourne-à-gauche; cette opération se fait d'ailleurs avec précision, mais aussi avec beaucoup de lenteur. Avec les vérins puissants, l'ascension de la charge est nécessairement lente; mais ce qui fait perdre beaucoup de temps, c'est la nécessité de dévirer pour ramener la vis à sa position initiale, chaque fois qu'on veut faire une reprise.

Certains vérins ont leur pied appuyé sur un chariot, sur lequel ils peuvent glisser sous l'effort d'une vis horizontale; cette disposition permet de déplacer transversalement la charge soulevée, faculté précieuse dans beaucoup de manœuvres.

On fait, depuis quelques années, un assez grand usage du vérin hydraulique; c'est un corps de presse, dont le fond plein porte la charge et dont le bas, percé d'un trou, laisse passer, à joint étanche, la tige d'un plongeur vertical s'appuyant sur le sol par une semelle. A l'aide d'une petite pompe à main, on refoule dans le cylindre le liquide contenu dans un petit réservoir, venu dans la fonte du corps de presse; un robinet à pointeau, établissant la communication de retour entre le cylindre et le réservoir, permet d'affaler la charge avec douceur et précision. La puissance peut être considérable, le rendement est élevé; le freinage à la descente, opéré par le liquide traversant l'ouverture étroite laissée par le robinet à pointeau, est très sûr et facile à gouverner.

L'appareil est donc excellent à presque tous les points de vue, mais il exige quelque soin pour l'entretien des joints et la purge de l'air; de plus, il est un peu lourd. Au besoin, le vérin hydraulique s'installe sur un chariot comme le vérin à vis.

Les crics, vérins et appareils analogues n'ont qu'une course fort limitée. Lorsque les charges ont à subir des déplacements un peu importants, dépassant quelques décimètres, on a presque toujours recours à des systèmes funiculaires.

La nature et le mode d'emploi du lien flexible exercent une grande influence sur les dispositions de la machine. Il convient de distinguer les liens à section uniforme de ceux à engrenage.

Les cordes en chanvre ou en métal représentent le type le plus simple des liens à section uniforme; on peut rattacher à la même catégorie les chaînes ordinaires non calibrées. Ces liens s'enroulent sur des surfaces lisses.

Des perfectionnements importants ont été apportés, dans ces dernières années, à la confection de ces sortes de liens. Les cordes en métal, en particulier, sont fabriquées en grand dans des usines importantes. Par une étude attentive de leurs éléments, par un choix judicieux et une mise en œuvre soignée de leurs matériaux constitutifs, on est parvenu à leur donner une grande résistance, une grande durée, et surtout une flexibilité et une souplesse qu'étaient loin de posséder les anciens câbles métalliques. Les procédés d'amarrage de ces cordes ont été beaucoup améliorés et doués d'une

solidité complète. Des progrès analogues ont été accomplis dans la fabrication des chaînes.

La surface lisse sur laquelle s'enroule le lien est, en général, de révolution. Dans les treuils, cette surface est constituée par un tambour cylindrique; le lien est fixé par un bout sur ce tambour, auquel une manivelle, par l'intermédiaire d'un train d'engrenage, imprime un mouvement de révolution. Le lien s'enroule en hélice sur le tambour; quelquefois, lorsque la longueur à enrouler est considérable, plusieurs couches de spires se superposent successivement, mais le serrage et les frottements qui en résultent ne sont pas sans fatiguer le lien.

Cet emmagasinement du câble présente d'ailleurs d'autres inconvénients. On l'évite à l'aide de l'artifice suivant. Le câble fait seulement deux ou trois tours sur le tambour; l'un de ses bouts reçoit la charge, l'autre est flottant et tenu à la main par un homme qui en règle la tension; de cette tension résulte une adhérence, qui fait que la partie enroulée devient solidaire du tambour et tourne avec lui, en s'enroulant d'une extrémité pour se dérouler de l'autre; l'arc embrassé reste constant, mais, à chaque tour, il se déplace, parallèlement aux génératrices du tambour, d'une longueur égale au pas de l'hélice, c'est-à-dire au diamètre du câble; il voyage ainsi de proche en proche et il finirait par atteindre la base du tambour. Pour éviter cet inconvénient, on donne au tambour la forme d'une sorte de tronc de cône à génératrice curviligne, convexe vers l'axe; l'obliquité des surfaces d'enroulement a pour effet de ramener constamment, par glissement, les spires enroulées vers la partie étroite du cône; le mouvement peut ainsi se continuer indéfiniment. Ces glissements entraînent des pertes d'effet utile et de l'usure dans les organes; mais le dispositif présente des avantages précieux : même pour une grande course du fardeau, les dimensions sont petites; en outre, l'homme qui contretient le bout flottant est maître de la manœuvre; en modifiant la tension, il peut, à volonté, soit déterminer une adhérence complète, soit modérer le frottement, de manière à ralentir le mouvement du fardeau, l'arrêter, ou même affaler la charge, en se servant du câble comme d'un frein.

C'est d'après ce principe que sont construits les cabestans; le tambour, eu égard à sa forme, prend ici le nom de *cloche*. Les treuils eux-mêmes sont quelquefois, en dehors du tambour, munis d'une poupée, agissant à la façon d'une cloche de cabestan.

Les treuils et les cabestans doivent être munis de cliquets ou de freins, pour éviter les dévirages qui, malgré ces précautions, se produisent quelquefois et ont entraîné de nombreux et graves accidents.

Lorsque le lien, au lieu de faire plusieurs circonvolutions, n'embrasse qu'une fraction de tour, la surface d'enroulement est taillée en forme de gorge et l'appareil prend le nom de *poulie*. Plusieurs poulies, réunies en système, forment un *palan*. Les poulies et les palans, machines fort légères et d'un usage commode, sont très répandues dans tous les ateliers; leur force est d'ordinaire limitée à quelques centaines de kilogrammes.

Pour nombre d'usages, le treuil ou le cabestan sont des appareils trop volumineux; la nécessité d'enrouler plusieurs fois le lien les rend encombrants. On évite cette difficulté à l'aide des liens à pas régulier, ou liens à engrenage. Le prototype de ces sortes d'organes est la chaîne de Vaucanson. Elle consiste, comme on sait, en une série d'articles en fil de fer, reliés l'un à l'autre par des branches latérales, et portant une partie droite, normale à la longueur de la chaîne, qui vient mordre dans l'intervalle des dents d'une roue d'engrenage. Le pas de la chaîne est égal à celui de la roue; l'entraînement est donc nécessaire, si petit que soit l'arc embrassé. C'est vers le milieu du siècle dernier que *Vaucanson* imagina le système en question. Il n'était pas établi de manière à transmettre de grands efforts, ni à donner une régularité bien complète.

André *Galle* a apporté de sérieux perfectionnements à cet organe rudimentaire. La chaîne de Galle, inventée en 1832, comporte, dans sa construction, une précision et une solidité comparables à celles des meilleurs mécanismes.

Neustadt a encore amélioré les détails de la construction et a appliqué cette chaîne à des machines manœuvrant des fardeaux extrêmement lourds, tels que les chaudières de navires, les gros canons de la marine, etc. La chaîne de Galle est également employée avec succès dans des machines de grande précision. On sait qu'elle constitue l'un des organes fondamentaux des bicyclettes.

Adolphe *Nepveu* fit faire à la question (1840) un nouveau pas; au lieu de donner à la chaîne une forme spéciale, qui lui permette d'engrener avec une roue dentée ordinaire, il prend le problème dans le sens inverse : partant d'une chaîne ordinaire, composée d'anneaux en fer rond et de forme ovale, il modèle la jante de la roue, de telle sorte que la chaîne s'y adapte comme dans un moule de fonderie. Cette roue, qui est en général de petit diamètre, eu égard aux efforts considérables qu'elle a à transmettre, revêt ainsi une forme particulière; on lui donne le nom de *noix*. La chaîne de Nepveu présente quelques avantages sur celle de Galle, celui notamment d'être absolument flexible dans le sens transversal.

Les organes que nous étudions doivent satisfaire à une condition essentielle : il faut qu'ils soient exactement calibrés, c'est-à-dire que leur pas soit rigoureusement égal à celui de la roue, et que les formes en contact s'épousent réciproquement, sinon il se produit des chocs au moment de la venue en prise, chocs d'autant plus désastreux que les efforts transmis sont plus importants. Cette condition est facile à remplir lors de la construction, mais cet état de choses ne se maintient pas toujours au bout d'un certain temps de service, lorsque les contacts se sont usés, que les articulations ont pris du jeu, que les divers éléments se sont allongés ou déformés. A ce point de vue, la transmission par chaînes calibrées est moins satisfaisante que la transmission par engrenages rigides.

Parmi les nombreuses applications de ces mécanismes, l'un des plus intéressants par sa légèreté et sa simplicité est le *palan différentiel*. Deux poulies munies de gorges à empreintes, et solidaires l'une de l'autre, sont montées sur un axe suspendu à un

point fixe; leurs diamètres sont très peu différents, de telle sorte que la jante de la grande poulie porte seulement un ou deux pas de plus que celui de la petite. Une chaîne calibrée et sans fin est jetée sur les deux poulies; elle forme ainsi deux anses; l'une des anses est flottante, l'autre supporte une poulie à crochet, à laquelle est suspendue la charge. Si l'on agit à la main sur un des brins de l'anse flottante, on fera tourner le système des deux poulies solidaires: pour un tour de ce système, l'anse chargée se raccourcira d'un pas, et, par suite, la charge sera soulevée d'une hauteur égale à un demi-pas. Le rapport des chemins parcourus par la puissance et le fardeau étant considérable, le poids que peut manœuvrer l'appareil est lui-même fort grand.

En général, les frottements sont assez importants pour que la charge reste suspendue sans l'intervention d'un cliquet.

Les maisons qui se livrent à la spécialité des appareils de levage à bras fabriquent d'ordinaire les divers modèles que nous venons d'étudier. Citons-en quelques-unes.

M. Foccroulle (Jules), de Liège, et M. Foccroulle (Charles), de Kinkempois-Angleur (lès Liège) exposent des crics et vérins solides et bien établis. M. Foccroulle (Charles) expose notamment un cric de 60 tonnes, de fort bonne construction, et un système de sûreté, consistant en un cliquet, qui mord dès que, volontairement ou non, on vient à lâcher la manivelle.

La Société anonyme de location et de constructions mécaniques, ancienne maison veuve Bernier et Cie, de Paris, fabrique des crics, des vérins à vis ou hydrauliques, des palans, poulies, treuils à tambour, palans différentiels, etc. Elle s'est fait principalement une spécialité des applications de la noix avec chaîne calibrée. Les treuils munis de cet organisme ont été complétés par des cliquets à empreintes mordant sur la chaîne elle-même, et par divers dispositifs de sûreté, bien combinés et d'une efficacité sérieuse; ils sont très répandus dans l'industrie du bâtiment.

Citons encore une jolie grue sur wagon construite par la Société Decauville aîné, de Petit-Bourg (Seine-et-Oise); elle est montée sur deux bogies, pouvant tourner dans une courbe de 8 mètres de rayon. Sa portée est de 3 mètres et sa puissance de 2 tonnes; c'est essentiellement un appareil de manutention.

M. Verlinde (Léon), de Lille, expose divers appareils de levage, principalement des moufles, des palans différentiels et des monte-charges.

On remarquait les intéressantes grues gerbeuses, exposées par MM. E. Mabille frères, d'Amboise (Indre-et-Loire), grues fixes, grues sur wagon ou sur chariot. Ces appareils sont élégants, bien construits et d'un usage sûr et commode.

Citons, pour terminer, des chaînes à maillons démontables, d'un modèle ingénieux, exposées par M. Édouard Augé, de Paris.

Dans tous les cas où les manœuvres à exécuter se renouvellent fréquemment en un même point, les appareils de levage à bras cèdent la place à des machines mises en mouvement par des moteurs mécaniques; l'installation est plus chère, moins élastique, mais les opérations sont bien plus économiques et, par-dessus tout, beaucoup plus rapides. Ce dernier point est d'une importance majeure dans la plupart des applications, et suffirait à lui seul pour décider la solution.

La puissance motrice est fournie par la vapeur. Quelques essais ont été tentés récemment pour faire servir au même usage les machines à gaz; le problème demeure à l'étude.

La vapeur peut être employée de différentes manières. Quelquefois la machine motrice est attelée directement sur l'appareil élévatoire, et la chaudière installée dans le voisinage. D'autres fois, au contraire, la puissance motrice est fabriquée par une usine centrale, et distribuée à distance par une canalisation d'eau comprimée ou d'électricité. Comparons ces différentes solutions.

La première est évidemment la seule qui convienne, lorsque l'appareil élévatoire est unique et fixe. Elle devient moins avantageuse lorsque cet appareil est mobile, lorsqu'il s'agit, par exemple, d'une grue roulante; il devient alors nécessaire que, non seulement la machine motrice, mais encore la chaudière soient solidaires de l'engin élévatoire et emportés dans son mouvement, ce qui ne laisse pas que de compliquer l'appareil, de le rendre coûteux, lourd et encombrant.

Les inconvénients du système sont, en outre, son rendement médiocre, ces petits moteurs n'ayant jamais un effet utile bien élevé, le temps et le combustible perdus pour la montée en pression, et enfin la nécessité d'un personnel suffisamment habile et expérimenté.

Sur les navires, chaque treuil a sa machine spéciale, et plusieurs de ces outils sont branchés sur une conduite générale de vapeur, alimentée par une chaudière unique. Mais c'est là un cas particulier, qui ne se rencontre guère dans les installations à terre.

Lorsque l'on a à desservir un certain nombre d'appareils élévatoires dispersés en divers points d'un atelier ou d'un chantier, les choses sont disposées de la manière suivante : une usine centrale à vapeur fabrique l'énergie, laquelle est ensuite distribuée aux appareils à l'aide de l'eau comprimée ou de l'électricité.

L'eau sous pression est fréquemment usitée pour cet usage; nous avons eu, à plus d'une reprise, l'occasion de citer des exemples grandioses de ce genre de transmission et d'indiquer les avantages qu'il présente : l'eau incompressible se prête admirablement à l'emmagasinement de l'énergie, laquelle se trouve ainsi constamment prête à faire le

service demandé; les récepteurs sont simples et rustiques; enfin l'eau constitue un frein parfait et permet d'exécuter les manœuvres avec une précision complète. La transmission par l'eau comprimée présente, par contre, cet inconvénient que les appareils, travaillant presque constamment au-dessous de leur charge maximum, dépensent néanmoins autant d'eau que si cette charge maximum leur était toujours imposée. Par suite de cette circonstance, la majeure partie de l'énergie est dissipée en frottements et le rendement mécaniquement faible. Lorsqu'il s'agit d'appareils mobiles, tels que les grues pivotantes ou roulantes, la question des joints entre la partie fixe et la partie mobile de la conduite ne laisse pas que d'être assez délicate; toutefois on peut la considérer aujourd'hui comme résolue, à l'aide de procédés simples et pratiques.

Depuis les récents progrès accomplis par les industries électriques, on a fait des tentatives pour employer l'électricité à la mise en mouvement des appareils de levage; nous en verrons quelques applications intéressantes et remarquables. Les conducteurs d'électricité sont beaucoup plus souples et maniables que les canalisations d'eau comprimée.

Enfin, on fait aussi quelquefois usage, pour le même objet, de transmissions mécaniques par câbles et poulies, mais ce procédé ne eut guère s'appliquer que dans des cas assez rares.

Un grand nombre d'exposants présentent des reuils ou des grues à vapeur. Ces machines, aujourd'hui fort répandues, sont en général bien établies et fonctionnent convenablement. Citons quelques-unes de ces expositions.

M. J. Voruz, constructeur à Nantes, expose une grue roulante pour chemin de fer à voie normale. Les dimensions principales sont les suivantes :

Force de la grue	libre	4,000 kilogr.
	étayée sur le sol	6,000
Portée horizontale du pivot au crochet		$5^{m}20$
Hauteur de la poulie de tête		7 50
Poids total en service		24,000 kilogr.

Le truc est en fer et à deux essieux; les traverses extrêmes portent à l'extérieur des vérins de calage, mobiles pour le transport. La grue tourne sur un pivot fixé au truc et entouré d'une arête de roulement, sur laquelle circulent quatre galets; autour du même axe est établie la crémaillère circulaire, sur laquelle fait prise le galet d'orientation. La partie pivotante est assemblée sur une plate-forme, qui porte la flèche, la chaudière, le mécanisme et les parquets et cabines. La flèche, en tôlerie, est à deux flasques; elle peut s'abaisser pour passer dans le gabarit. La machine, horizontale et à deux cylindres, actionne un arbre, sur lequel sont calés les cônes de friction, permettant de produire les divers mouvements, savoir : élévation de la charge, rotation de la grue, avancement sur la voie. La cheminée de la chaudière est démontable. Tout l'appareil est dessiné de manière à passer dans le gabarit et à s'atteler dans un train.

L'importante maison de construction Caillard frères, du Havre, s'est fait une spécialité des appareils de levage, et en a établi un grand nombre de modèles, adaptés aux besoins les plus variés. Nous en décrirons seulement quelques-uns présentant certaines particularités intéressantes.

Ce sont d'abord une série de treuils à bras, à simple ou double engrenage, à tambour ou à noix, fixes ou roulants. Comme appareils à vapeur, nous citerons le treuil

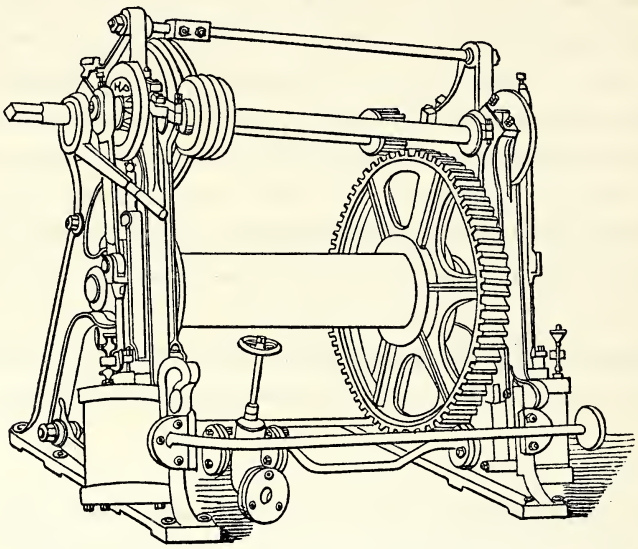


Fig. 256. — Treuil à vapeur de MM. Caillard frères.

représenté par la figure 256. Les deux cylindres à vapeur agissent sur l'arbre du tambour par un arbre intermédiaire, qui prend son mouvement sur l'arbre du moteur au moyen de disques à friction cannelés, de manière à limiter l'effort développé et l'effet dangereux des chocs. Un seul levier suffit à toute la manœuvre; il commande l'admission de vapeur. Abandonné à lui-même, il ferme l'admission de vapeur et serre le frein, la charge restant suspendue; légèrement soulevé, il permet à la charge de s'affaler lentement.

Voici (fig. 257), des mêmes constructeurs, une grue roulante à vapeur, d'une construction fort simple et bien entendue. Ce modèle a été étudié en vue des déchargements rapides des houilles, sables et autres marchandises en vrac. Deux leviers suffisent à la manœuvre : l'un, établi comme dans le modèle précédent, produit le mouvement vertical de la charge; l'autre donne les mouvements d'orientation et d'avancement. Un grand nombre de ces appareils, de puissances et de portées différentes, fonctionnent dans nos ports et sur nos voies ferrées.

MM. Caillard frères construisent également des appareils fonctionnant à l'eau sous pression, ainsi que des pontons-grue pour le déchargement sur bas-ports.

MM. Sautter, Lemonnier et Cie, de Paris, ont fait, dans la construction des appa-

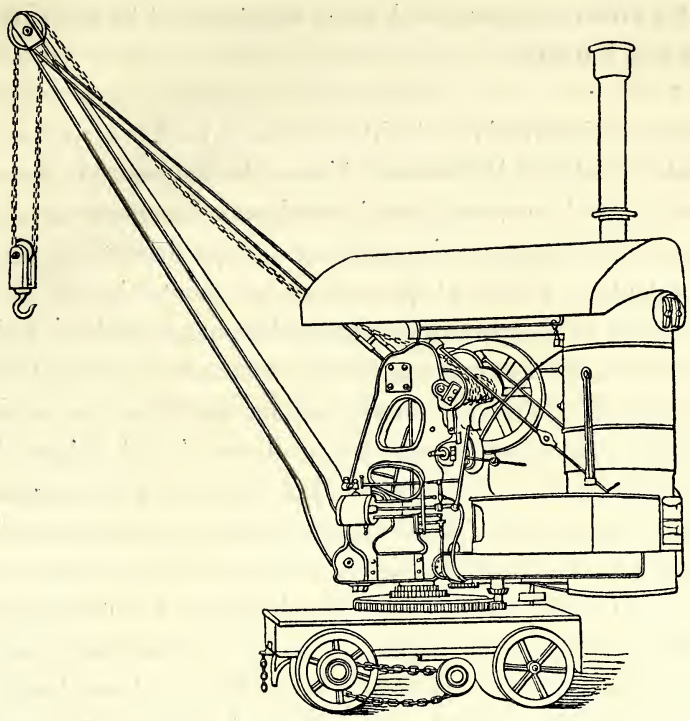


Fig. 257. — Grue roulante de MM. Caillard frères.

reils de levage, des applications nombreuses et variées d'un système d'embrayage bien connu, imaginé par MM. Mégy, Echeverria et Bazan. L'organe principal de cet embrayage est un ressort, qui peut frotter dans l'intérieur d'un tambour. L'effort exercé sur la manivelle a pour effet de modifier la tension de ce ressort et, par suite, le frottement qu'il exerce. Suivant que la manivelle est poussée dans un sens ou dans l'autre, la charge s'élève ou s'affale; lorsque la manivelle est lâchée, la charge reste suspendue. On peut aussi faire agir un régulateur centrifuge sur le ressort et transformer ainsi le dispositif Mégy en modérateur de vitesse.

MM. Sautter et Lemonnier se sont aussi attachés à appliquer aux appareils de levage la transmission électrique de l'énergie.

Des nombreux mécanismes exposés par cette maison, nous citerons seulement un treuil électrique pour pont roulant, actionné par une dynamo, à l'aide d'une vis sans fin; ce treuil est du système Mégy, avec modérateur de vitesse; sa puissance est de 3,000 kilogrammes et la vitesse ascensionnelle de 2 m. 10 par minute.

La même maison expose plusieurs treuils à bras, de puissances diverses, pour usages variés, une gerbeuse, etc.

L'importante exposition de MM. Bon et Lustremant, de Paris, outre divers objets intéressants sur lesquels nous aurons à revenir, comporte une grue roulante à vapeur,

dans laquelle les divers mouvements, levage, orientation et translation, sont obtenus par des embrayages à friction.

La Compagnie des chemins de fer de l'Ouest a établi, pour le service de la gare Saint-Lazare, une vaste installation hydraulique. L'usine de compression, élevée dans la gare des Batignolles, fournit l'eau comprimée à une longue canalisation, sur laquelle sont branchés plusieurs accumulateurs intermédiaires, et qui dessert une série d'appareils de manœuvre, cabestans, treuils, plaques tournantes, monte-charges, ascenseurs, etc., grâce auxquels toutes les manœuvres se font rapidement, facilement, avec une parfaite précision et un personnel très restreint. Tous ces mécanismes ont été construits par la Compagnie de Fives-Lille (Nord). Nous décrirons seulement les cabestans hydrauliques. Ces cabestans ne laissent apparaître au-dessus du sol qu'une cloche à deux gorges, sur laquelle l'homme de manœuvre jette deux ou trois tours de la corde de traction, en même temps qu'il appuie sur une pédale, qui commande l'admission de l'eau comprimée. Le mécanisme moteur est au-dessous du sol, dans une cave couverte par une plaque de fonte, qui sert de bâti à l'appareil. Cette plaque peut se renverser, en tournant autour d'une charnière horizontale et mettant ainsi à nu tout le mécanisme. L'eau motrice arrive et sort par les tourillons de la charnière. La machine motrice est du genre Brotherhood, à trois cylindres à simple effet, convergeant sur la manivelle sur laquelle est montée la cloche. Le système a été établi en 1886 à la gare des messageries de Saint-Lazare.

La Compagnie de Fives-Lille a également construit des grues hydrauliques mobiles, qui font le service des nouveaux quais de rive gauche de la Seine à Rouen; la puissance de ces grues est de 1,250 kilogrammes et la portée utile, mesurée du parement du mur de quai, est de 7 m. 50. La partie pivotante est montée au sommet d'un chevalet, roulant sur une voie ferrée parallèle au mur de quai et de 4 mètres de largeur. Cette voie comprend une voie normale de chemin de fer, et le chevalet présente, entre ses montants, une section libre dégageant le gabarit des wagons. Il est construit en tôle et cornières. Il porte, sur sa face supérieure, un chemin circulaire de roulement, centré sur le pivot de la grue. Il peut être calé au moyen de quatre vérins. Le déplacement se fait à bras à l'aide de manivelles.

La grue est à contrepoids variable; le dévers est prévenu par six galets, circulant sur le cercle de roulement, avec accrochage au-dessous du rail de ce cercle. La levée est faite par un piston portant poulie mouflée; elle est de 15 mètres, la course utile du piston étant de 2 m. 50. La rotation est produite par deux brins de chaînes actionnés chacun par une presse horizontale.

M. Guyenet, de Paris, avait une exposition du plus haut intérêt, comportant des appareils de levage extrêmement remarquables, et sur lesquels nous aurons à revenir. Contentons-nous, pour le moment, de rappeler les belles grues roulantes à vapeur, de

3 tonnes et de 8 tonnes, qui portaient, dans leurs dispositions d'ensemble aussi bien que dans tous leurs détails, ce cachet d'originalité et d'étude approfondie qui caractérise tous les mécanismes projetés par M. Guyenet.

Citons encore un beau modèle de grue flottante, exposé par l'importante maison Hunter et English, de Londres, puis une grue roulante électrique présentée par MM. Elwell fils, de Paris.

Nous arrivons à l'importante question des ascenseurs.

Depuis fort longtemps, dans les établissements industriels, on faisait usage de monte-charges, mus mécaniquement et destinés à faciliter la répartition des marchandises aux différents étages des magasins. Malgré la défense qui en était faite, on ne pouvait guère empêcher les ouvriers de s'en servir. Plus hardis, plus confiants dans les mécanismes, les Américains ne tardèrent pas à établir des ascenseurs spécialement destinés au service des personnes. L'appareil, retour d'Amérique, fut inauguré, dans notre pays, à l'Exposition de 1867, où il obtint le plus brillant succès. Immédiatement, il se répandit dans les usages; il fut d'abord adopté par les grands établissements desservant un public nombreux et habitué au confortable, hôtels, magasins de nouveautés, etc. Il se passa cependant plusieurs années avant que les ascenseurs devinssent d'un emploi un peu général dans les maisons particulières. C'est qu'en effet les conditions diffèrent par un point important : dans un établissement fréquenté par un public nombreux, le service de l'ascenseur est incessant, et on affecte un agent spécial à l'appareil. Il n'en est pas de même dans une maison particulière : chaque voyageur doit faire lui-même la manœuvre; il a fallu beaucoup d'études pour donner aux ascenseurs les qualités qui inspirent confiance et permettent de les laisser manœuvrer sans danger par la première personne venue. En fait, ces appareils, déjà fort nombreux et comptant plusieurs années de service, n'ont donné lieu jusqu'ici qu'à de fort rares accidents.

Comparé à l'escalier, l'ascenseur présente des avantages d'une grande importance. Contrairement aux idées qui ont cours, l'ascenseur offre plus de sécurité que l'escalier; pour être moins racontées et faire moins de bruit dans la presse, les chutes dans les escaliers ne laissent pas que d'être assez fréquentes; elles ont parfois des conséquences douloureuses. L'ascension d'un escalier est chose fatigante pour tout le monde; quand l'opération se répète, elle devient pernicieuse pour nombre de personnes, pour les femmes, pour les gens faibles ou atteints de certaines affections; elle est impossible pour beaucoup de malades. Au point de vue hygiénique, la supériorité de l'ascenseur est incontestable; l'ascenseur permet d'habiter sans fatigue les étages supérieurs, où l'air est pur, où pénètre la lumière, où l'on est éloigné des bruits, des odeurs et de la poussière de la rue.

Aujourd'hui encore, et malgré une expérience déjà longue, l'ascenseur est souvent regardé comme un objet de luxe, réservé aux classes riches de la société. Il y a là un

préjugé bien étrange, et qui a eu des suites regrettables. C'est principalement aux pauvres gens que l'ascenseur rendrait des services inestimables, à l'ouvrière surtout, dont le temps, les forces et la santé sont si précieuses, qui sort plusieurs fois par jour pour porter son ouvrage ou aller aux provisions, et revient chaque fois chargée de fardeaux qu'il lui faut péniblement hisser jusqu'à sa mansarde. Au point de vue économique, pas le moindre doute : un ascenseur simplement construit n'est pas cher à établir; dût-on même, pour tout prévoir, doubler l'installation, on serait loin encore d'atteindre le prix de l'escalier le plus modeste. Reste la question de la puissance motrice nécessaire pour actionner l'appareil. C'est là une question qui ressortit le plus souvent aux administrations publiques, et, sur ce terrain, il s'est commis parfois des erreurs bizarres et funestes.

On peut aujourd'hui, sans grand risque de se tromper, tracer le programme des conditions générales auxquelles doit satisfaire un ascenseur. Nous choisirons le cas le plus difficile, celui d'un ascenseur pour maison particulière, manœuvré par les personnes qui ont à en faire usage.

Les deux conditions les plus indispensables à remplir sont : la sécurité et une manœuvre facile et sûre. La sécurité doit s'entendre ici dans le sens le plus absolu; il faut non seulement qu'il n'y ait aucun danger, mais encore qu'il n'y ait pas même apparence de danger, car une personne timide ou nerveuse peut s'affoler, perdre la tête et changer en catastrophe l'incident le plus insignifiant.

De cette donnée découlent un certain nombre de conséquences.

L'appareil sera bien conçu, bien établi, robuste; l'entretien sera soigné; des vérifications, visites et essais seront périodiquement pratiqués. Les choses seront disposées de telle sorte que la vitesse ne puisse pas devenir inquiétante. Parfois, en prévision de ruptures, on installe des parachutes destinés à maintenir la cabine suspendue; l'efficacité de ces appareils n'est pas bien démontrée; de bons ingénieurs les regardent, en principe, comme plus dangereux qu'utiles. En tout cas, il vaut mieux prévenir les ruptures par un excès de résistance des organes qu'à l'aide d'organes supplémentaires.

Des précautions spéciales seront prises pour éviter un accident qui s'est produit quelquefois. Lorsque la cabine circule dans une cage étroite, des personnes inattentives peuvent être saisies et blessées entre la cabine en mouvement et les parties solides qui l'avoisinent.

Il est utile que la cabine soit couverte d'une toiture, pour éviter les accidents résultant de la chute d'objets lourds.

En ce qui concerne la manœuvre, une instruction simple et précise sera affichée aux abords de l'appareil. Un système de serrures à boutons permettra au voyageur montant de déterminer, avant la mise en marche, l'étage auquel il doit s'arrêter. L'arrêt se fera en douceur, au niveau exact ainsi déterminé. Des enclenchements solidement établis assureront les conditions ci-après : tout mouvement de la cabine est impossible aussi longtemps qu'une quelconqne des portes palières n'est pas entièrement fermée; aucune

porte palière ne peut s'ouvrir tant que la cabine n'est pas à hauteur de cette porte. La cabine doit s'arrêter d'elle-même à l'étage supérieur et au bas de sa course, en l'absence de toute indication, et sans pouvoir en aucun cas dépasser ces limites.

Si toutes les conditions de ce programme sont remplies, le service d'un ascenseur peut être considéré comme tout à fait sûr, d'une sécurité supérieure à celle que présentent les escaliers.

Dans la plupart des grandes villes munies d'une distribution d'eau, c'est l'eau empruntée à la canalisation publique qui est ordinairement employée comme agent moteur. On obtient ainsi un mécanisme simple, toujours prêt à fonctionner; l'eau, par son incompressibilité, assure à merveille la douceur et la précision des arrêts. Elle constitue un modérateur de vitesse d'une sécurité parfaite. Il est vrai que l'eau sous pression livrée par les services municipaux se vend à un prix élevé, mais, le plus souvent, cette considération n'a qu'une importance secondaire, eu égard à la petite quantité que consomme un ascenseur ordinaire. Dans certains cas, il y a avantage à se passer de la canalisation publique et à élever directement dans un réservoir supérieur l'eau qui doit agir dans l'ascenseur.

L'eau sous pression s'emploie de différentes façons. L'un des systèmes les plus répandus est celui installé par M. Édoux à l'Exposition de 1867. Dans un puits foré, on établit un tuyau formant corps de presse, dans lequel pénètre, à joint étanche, un long piston plongeur, dont la tête s'assemble à la cabine, convenablement guidée. Les poids du piston plongeur et de la cabine sont équilibrés par des contrepoids suspendus à des chaînes ou des câbles, qui passent sur des poulies fixes et viennent s'attacher à la cabine. On conserve, du côté du piston, une prépondérance convenable, pour que la cabine puisse redescendre à vide, compte étant tenu des frottements; les chaînes reçoivent un poids suffisant pour qu'elles fassent constamment équilibre à la perte de poids due à l'immersion du plongeur, de telle sorte que la prépondérance reste constante en tous les points de la course. Ces chaînes présentent ainsi un excédent de section très favorable à la sécurité. La distribution se fait de la cabine et de l'extérieur à l'aide de cordes et tringles de manœuvre agissant sur un tiroir. D'ailleurs les diverses précautions énumérées précédemment pour assurer les arrêts et condamnations de manœuvre s'appliquent sans difficulté. Le système est simple de construction, sûr comme fonctionnement; la cabine, qui semble reposer sur le plongeur, se présente sous un aspect rassurant; les chaînes qui la soutiennent se dissimulent facilement dans les angles. Le seul point qui laisse à désirer, c'est l'impossibilité où l'on se trouve de visiter le corps de presse, qui, enfoui dans son puits, peut s'oxyder ou se détériorer sans qu'on en soit prévenu. Le dispositif étudié par M. Édoux a été reproduit à un grand nombre d'exemplaires, soit par lui-même, soit par d'autres constructeurs. L'expérience a naturellement apporté des améliorations de détail, dont quelques-unes ne sont pas sans importance.

L'eau comprimée est aussi employée d'une autre façon : elle est envoyée dans un

piston mouflé analogue à ceux des appareils Armstrong; le brin libre du câble mouflé, après avoir passé sur des poulies de renvoi, vient s'attacher au toit de la cabine. Le système est peut-être moins satisfaisant comme aspect; eu égard à l'élasticité du câble, qui est fort long, les arrêts sont moins précis; il est parfois difficile de donner aux poulies un diamètre assez grand pour que le câble ne soit pas fatigué. Par contre, toutes les parties de l'appareil sont faciles à visiter et à réparer.

Il existe d'autres manières encore d'appliquer l'eau comprimée à la manœuvre des ascenseurs; nous en verrons quelques exemples. Outre les précautions générales que nous avons rappelées précédemment, il convient, lorsqu'on se sert d'eau sous pression, de ne pas perdre de vue un phénomène qui a causé de graves accidents : le cantonnement de l'air dans les conduites et le corps de presse; cet air, agissant comme un ressort, enlève toute précision aux arrêts. Il importe de s'en débarrasser d'une manière certaine.

En Amérique, on commande les ascenseurs par des moteurs quelconques, à vapeur, électrique ou autres, mais les conditions de fonctionnement sont toutes différentes.

L'Exposition de 1889 était riche en ascenseurs. La galerie des Machines comportait un ascenseur spécial, amenant les visiteurs à la plate-forme surélevée, située dans le voisinage de la façade Sud-Ouest; puis les ascenseurs desservant les deux ponts roulants; dans la galerie de 30 mètres, on trouvait deux ascenseurs Samain; la tour Eiffel était desservie par cinq ascenseurs, aboutissant aux divers étages. Divers monte-charges et ascenseurs étaient répartis dans les constructions élevées dans les parcs et jardins; les deux tours du Trocadéro renfermaient les ascenseurs construits en 1878. Tous ces appareils étaient mus par l'eau comprimée. Un seul ascenseur actionné par l'électricité figurait à l'Exposition; il était installé dans le pilier Nord du grand portail Nord-Est de la galerie des Machines.

La plupart de ces appareils, établis en vue de destinations toutes spéciales, différaient beaucoup des ascenseurs ordinaires établis dans les maisons privées. Nous décrirons seulement quelques-uns des plus remarquables, soit par leurs dimensions, soit par leurs dispositions.

MM. Samain et Cie, de Paris, avaient construit deux ascenseurs, dans les deux pieds-droits de la porte faisant communiquer le palais des Machines à la galerie de 30 mètres; ces ascenseurs élevaient les visiteurs jusqu'au balcon qui faisait le tour du palais à une hauteur de 8 mètres au-dessus du sol. On retrouve dans ces appareils l'originalité de conception dont M. Samain a fait preuve dans les nombreuses applications hydrauliques dont il est l'auteur.

Les cabines ne sont pas équilibrées par des contrepoids; pour éviter que le plongeur supportant le poids de la cabine ne soit exposé à fléchir comme une colonne chargée de bout, le constructeur a eu recours à un artifice très simple, mais dont on

ne s'était pas encore avisé : le plongeur est creux et ouvert par le bas, de sorte que la pression de l'eau s'applique directement sous le plancher de la cabine ; les parois latérales du plongeur sont ainsi simplement suspendues par le haut et n'ont aucune tendance à fléchir ; l'auteur les fait fort minces et les constitue par un simple tube de laiton.

Grâce à cet artifice, la rigidité du plongeur devient inutile ; M. Samain a tiré parti de cette remarque dans l'un des deux ascenseurs qu'il a établis. Le tube est en deux tronçons, rentrant l'un dans l'autre à la façon des éléments d'une lorgnette ; au lieu de deux tronçons, on peut en mettre trois ou quatre, et par conséquent supprimer le puits profond des ascenseurs à plongeur ordinaire.

La cabine est, non plus suspendue, mais supportée ; elle repose sur l'eau sous pression, qui en porte le poids entier. La dépense de travail et, par suite, d'eau motrice serait donc considérable. M. Samain a paré à cette difficulté, en équilibrant une partie du poids de la cabine par l'intermédiaire de l'eau elle-même. A cet effet, sur le parcours de l'eau motrice, est interposé (fig. 258) un piston *A*, soulevé par un fort contrepoids *B*, à l'aide d'un ruban de cuivre qui passe sur une poulie *C* et pénètre dans le corps de

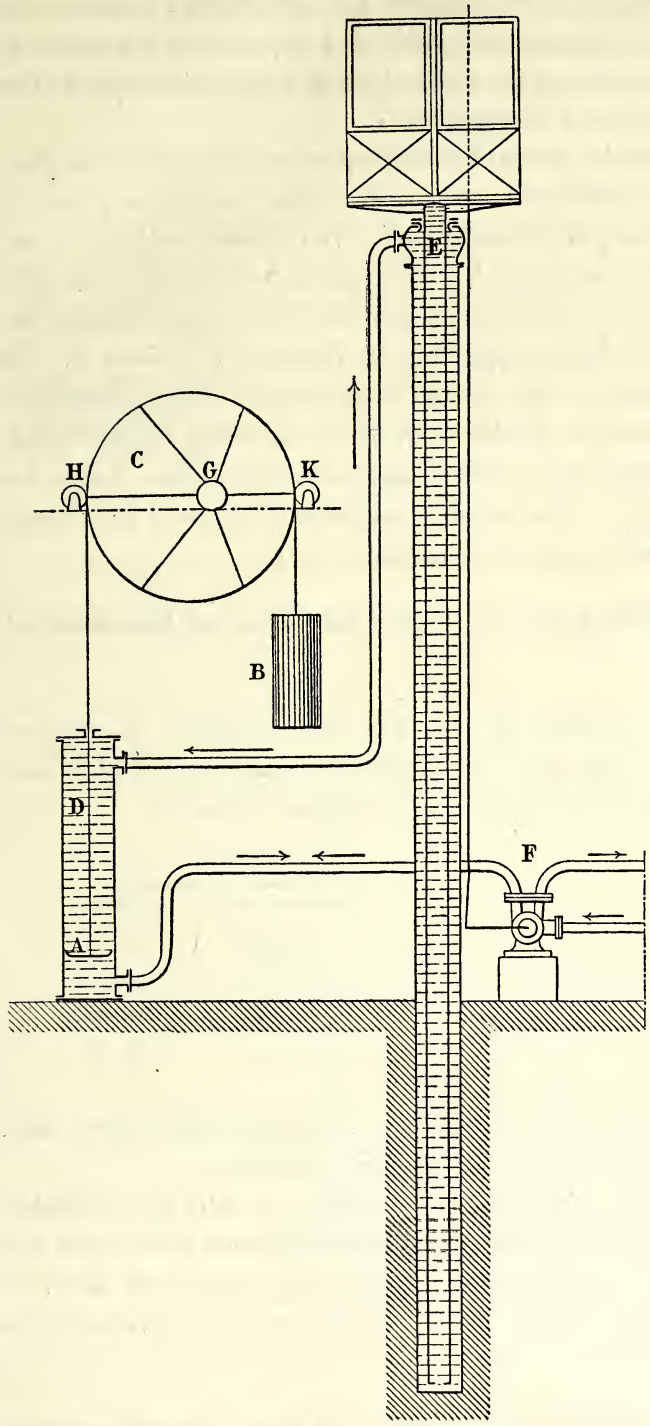


Fig. 258. — Ascenseur Samain.

pompe *D* par un large presse-étoupe; c'est le contrepoids *B* qui équilibre la cabine par l'intermédiaire de l'eau comprise entre le piston *A* et le plongeur *E*; cette eau est toujours la même et ne fait que voyager du cylindre *D* à la presse de l'ascenseur ou réciproquement, suivant que le dessous du piston *A* est mis en relation, par le distributeur *F*, avec la pression ou avec l'échappement.

Le poids à équilibrer est variable, suivant l'émersion plus ou moins grande du plongeur; pour rendre l'équilibre sensiblement constant, M. Samain excentre la poulie *C*; l'axe excentré *G* repose dans des paliers faisant partie d'un chariot, mobile sur une glissière horizontale, et dont les deux galets *HK* déterminent le mouvement, de telle sorte que le brin *HA* du ruban soit constamment vertical. C'est toujours, avons-nous dit, la même eau qui remplit le volume compris entre le plongeur et le piston *A*; cette eau ne tarde pas à devenir grasse, ce qui atténue notablement les frais d'entretien. Pour obvier aux fuites qui peuvent se produire, M. Samain installe, sur la conduite d'eau en pression, un petit clapet que la cabine manœuvre d'elle-même chaque fois qu'elle arrive au bas de sa course, et qui introduit au-dessus du piston *A* l'eau nécessaire pour ramener le contrepoids à sa position normale.

Citons encore le très joli modèle d'ascenseur, exposé par l'Hydraulic Engineering C°, de Chester (Grande-Bretagne).

Arrivons aux ascenseurs qui faisaient le service de la tour Eiffel, et rappelons d'abord les dimensions principales de la tour. Les hauteurs au-dessus du sol et les hauteurs d'une plate-forme à l'autre sont données dans le tableau ci-dessous :

	HAUTEURS au-dessus du sol.	HAUTEURS partielles.
Première plate-forme	$57^{m}63$	//
Deuxième plate-forme	115 73	$58^{m}10$
Troisième plate-forme	276 13	160 40
Sommet de la tour	300 00	23 87

La tour repose sur quatre piliers inclinés, formant les sommets d'un carré, dont les angles sont dirigés sensiblement vers les quatre points cardinaux.

Le premier étage est desservi par deux ascenseurs étudiés par MM. Roux, Combaluzier et Lepape, et installés dans les piliers Est et Ouest. Les piliers Nord et Sud sont occupés par des ascenseurs Otis, conduisant au deuxième étage de la tour. Enfin un ascenseur construit par M. Édoux franchit l'espace compris entre la deuxième et la troisième plate-forme.

Les deux ascenseurs du système Roux, Combaluzier et Lepape ont été construits par la Société anonyme des établissements de construction mécanique Carion-Delmotte, d'Anzin; les dispositions mécaniques ont été étudiées par M. Guyenet.

Cet ascenseur peut recevoir cent voyageurs; la hauteur verticale entre les deux stations est de 54 m. 25 : la voie est inclinée et de pente variable, suivant le profil du pilier dans lequel elle est attachée; la longueur des rails entre les deux stations est de 66 m. 60. En service régulier, l'appareil peut faire à l'heure 11 voyages, aller et

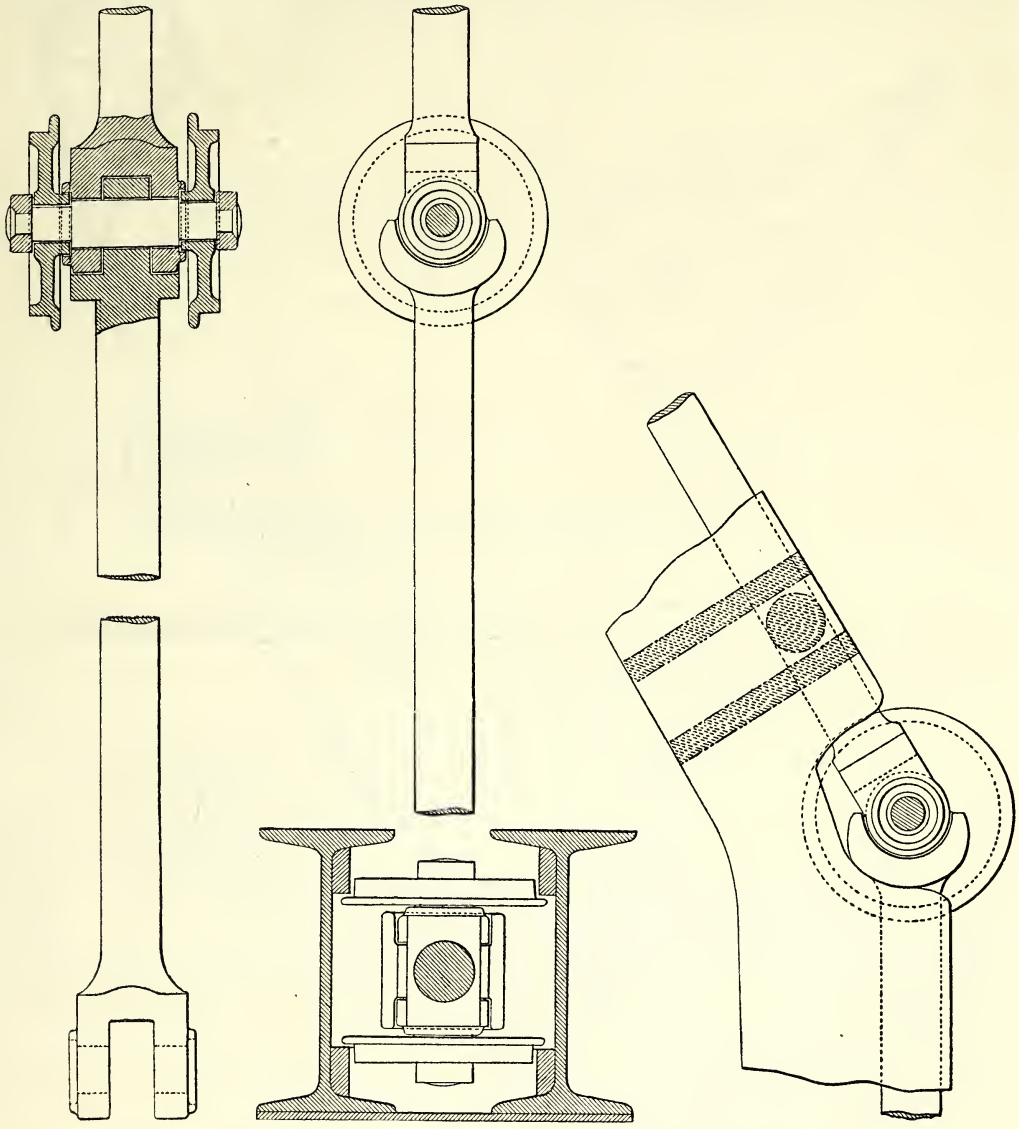


Fig. 259. — Ascenseur Roux, Combaluzier et Lepape. Détail de la chaîne.

retour; la vitesse moyenne d'ascension est de 1 mètre par seconde suivant la verticale, de 1 m. 22 suivant l'oblique.

Les inventeurs se sont donné comme condition de ne faire travailler qu'à la compression les organes qui supportent la cabine. La courbure de la voie ne permettant pas d'employer une tige rigide, l'appareil de propulsion (fig. 259) est constitué par une

IMPRIMERIE NATIONALE.

chaîne articulée circulant dans une gaine qui guide ses mouvements. Les maillons de cette chaîne, constitués par de fortes bielles de 1 mètre de longueur, s'articulent, deux par deux, sur un axe, lequel porte une paire de galets, roulant sur des rails fixés dans

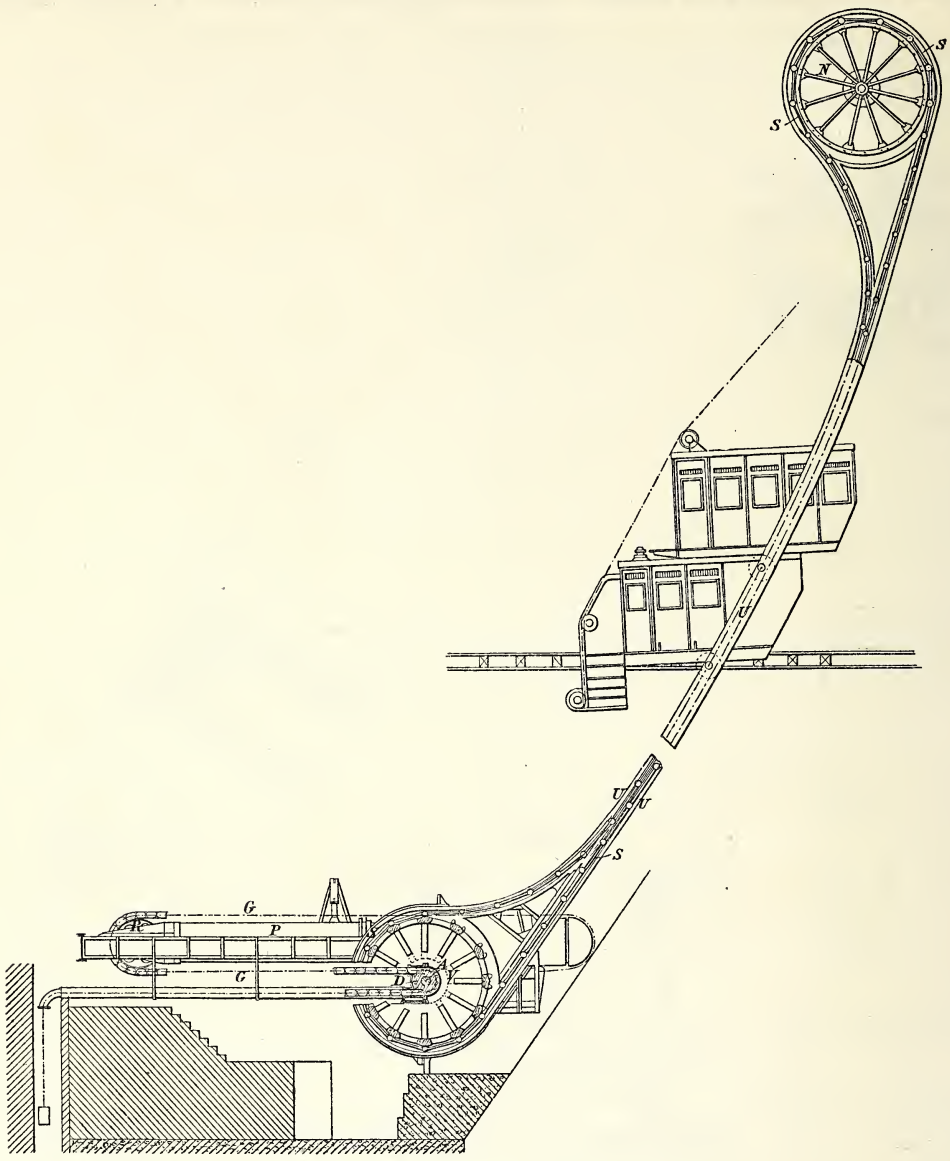


Fig. 260. — Ascenseur Roux, Combaluzier et Lepape. Ensemble de l'appareil.

la gaine. Deux chaînes pareilles, avec leur guidage, sont disposées de part et d'autre de la voie de la cabine.

La cabine (fig. 260) est à deux étages; elle roule sur deux rails distants de 3 m. 64, et s'attache à l'un des maillons des chaînes articulées.

Chaque chaîne fait un circuit fermé, en passant sur deux poulies de 3 m. 864,

l'une motrice, placée dans le bas, l'autre de renvoi, installée à l'étage; le brin porteur circule au-dessous de l'autre; le brin de retour, plus long par l'effet des courbes de son profil, comporte des chaînons à contrepoids, destinés à équilibrer partiellement le poids de la cabine; ces chaînons sont en fer carré, entouré de fonte et de plomb. La cabine vide pèse 8,200 kilogrammes, le contrepoids 3,900 kilogrammes, de sorte que

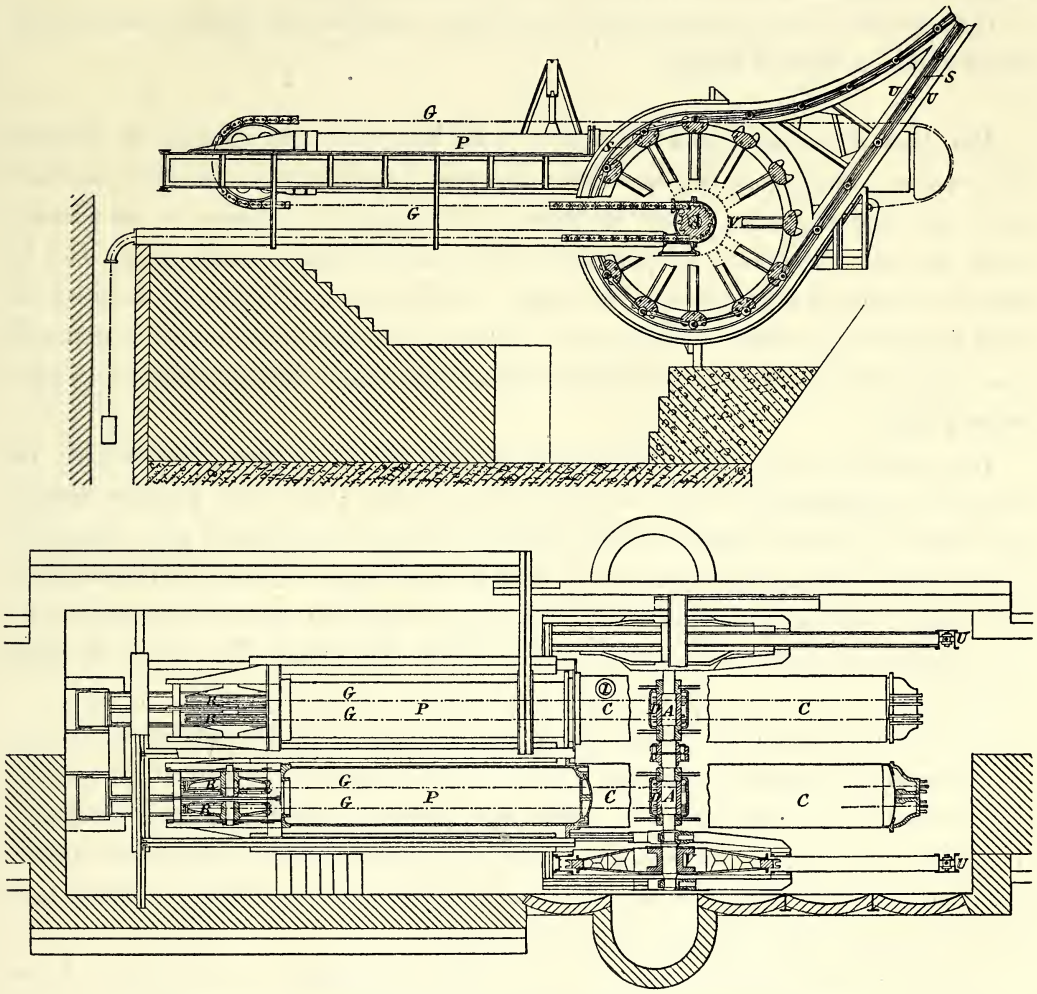


Fig. 261. — Ascenseur Roux, Combaluzier et Lepape. Mécanisme moteur.

la prépondérance de la cabine est de 4,300 kilogrammes. Sur le brin de retour, l'un des chaînons a la forme d'un tendeur à vis, ce qui permet de régler la tension et de rattraper le jeu.

L'appareil moteur (fig. 261) est constitué par deux presses Armstrong, avec plongeur portant des poulies mouflées. Ces poulies reçoivent des chaînes de Galle, attachées à un point fixe, et dont le brin libre engrène sur un pignon fixé sur l'axe de la poulie motrice. Chaque presse comporte deux chaînes parallèles. Le diamètre du piston

est de 1 m. 05, et sa course de 5 m. 05; le cylindre, en tôle rivée, a 1 m. 20 de diamètre. La multiplication, c'est-à-dire le rapport de la course de la cabine à celle du piston, est de 13,2. La pression est donnée par un réservoir installé sur la deuxième plate-forme de la tour, et dont le fond est à 115 m. 40 au-dessus de l'axe du cylindre, ce qui donne un effort de 11 kilogrammes par centimètre carré de section transversale. La dépense d'eau par voyage est de 8,75 mètres cubes.

Cet appareil, dont le principe peut être discuté, constitue une étude de mécanique remarquable et digne d'intérêt.

MM. Otis frères (American Elevator C°), de New-York, ont imaginé un système d'ascenseurs, dont ils ont fait un nombre immense d'applications aussi bien en Amérique que dans toutes les parties du monde; cette importante maison a des succursales, non seulement dans les principales villes des États-Unis, mais encore dans la plupart des capitales de l'Europe, et même à Melbourne et à Sydney en Australie. Il n'est peut-être pas inutile, à ce propros, d'attirer l'attention sur l'habileté consommée que déploient les constructeurs américains pour faire valoir leurs produits et en propager l'usage.

Les ascenseurs du système Otis sont essentiellement des appareils funiculaires. La cabine est suspendue à un câble ou un faisceau de câbles, qui s'élève jusqu'au sommet de l'édifice à desservir, passe sur des poulies de renvoi et redescend pour s'enrouler sur les poulies d'un palan mouflé, dont l'une des armatures est fixe et l'autre solidaire d'un piston hydraulique; le dispositif a ainsi pour effet de renvoyer à la cabine les mouvements du piston, amplifiés dans un rapport qui résulte du nombre de brins mouflés.

Le système présente des avantages sérieux; les masses en mouvement sont moins importantes que dans les ascenseurs à puits, ce qui atténue les résistances passives; le cylindre moteur et la plupart des organes sont apparents, faciles à visiter et à réparer; l'appareil se prête également bien à l'installation d'enclenchements et condamnations de manœuvres; peut-être, par le fait de la multiplication des mouvements, les arrêts laissent-ils quelque chose à désirer comme précision.

L'objection la plus grave est relative aux câbles métalliques; la fabrication de ces câbles a fait, il est vrai, des progrès importants; on les fournit aujourd'hui très résistants à la fois et très souples; néanmoins, par suite de l'exiguïté des emplacements alloués, le constructeur est d'ordinaire obligé de réduire outre mesure le diamètre des poulies sur lesquelles s'enroulent les câbles; sans doute la fatigue imposée par l'enroulement est loin d'atteindre les valeurs énormes indiquées dans beaucoup d'aide-mémoire; néanmoins, il y a là une cause, sinon d'insécurité, du moins d'inquiétude; et en tout cas ces câbles, un peu surmenés, ont besoin d'être surveillés et de temps à autre renouvelés.

Pour parer au danger possible, MM. Otis ajoutent à leurs ascenseurs des parachutes,

organes automatiques qui doivent arrêter la cabine en cas d'incident imprévu. Il serait désirable que l'on pût se passer de ces accessoires un peu compliqués.

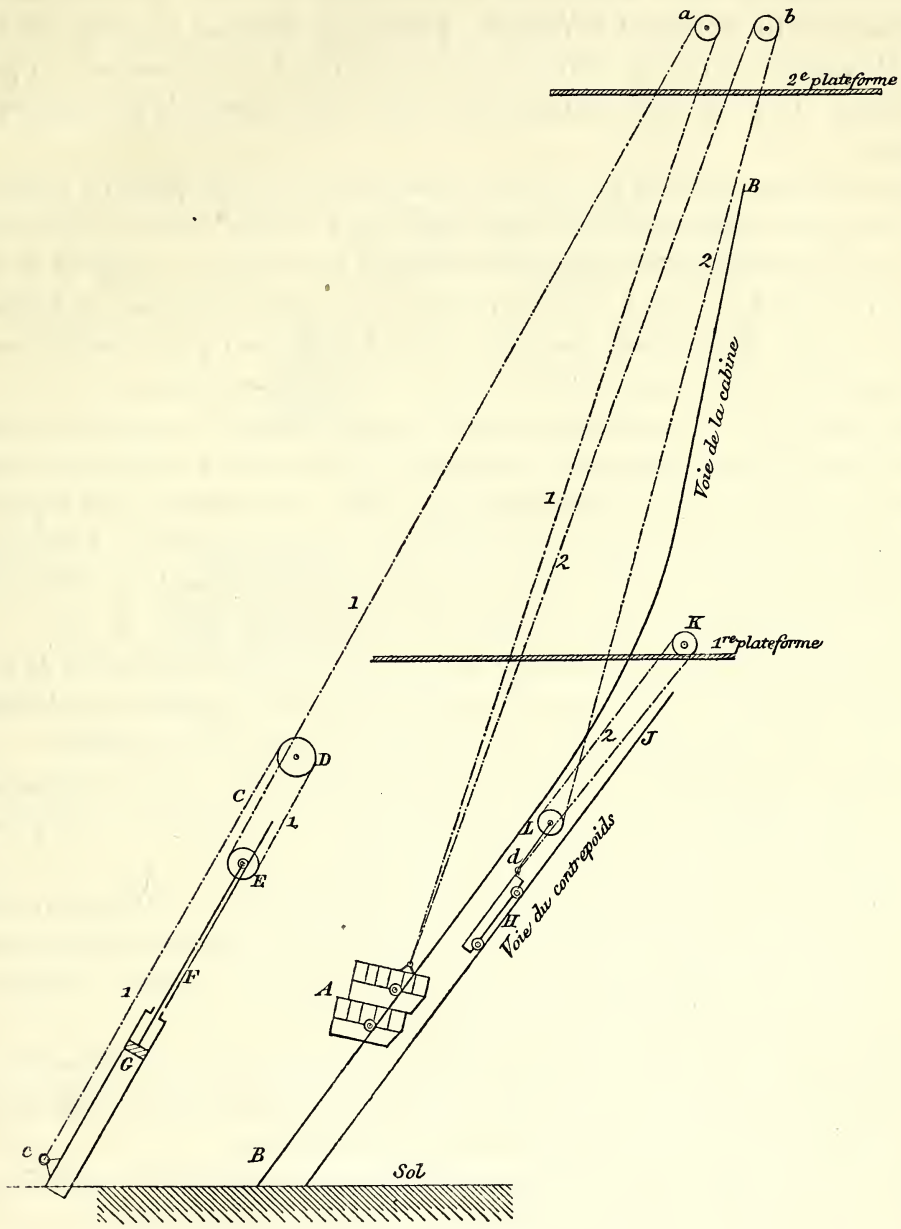


Fig. 262. — Ascenseur Otis.

Les deux ascenseurs établis à la tour Eiffel par MM. Otis desservaient, avons-nous dit, le premier et le deuxième étage. La figure 262 est le schéma de l'un de ces beaux appareils, schéma extrêmement simplifié, où ne figurent que les organes les plus essentiels, sans aucune relation d'échelle. La cabine *A* roule sur une paire de rails

constituant une voie inclinée *BB*, solidement rattachée aux parties fixes de la tour. Elle est soutenue par deux faisceaux de câbles. Le faisceau 1, après avoir passé sur une poulie fixe *a*, installée au-dessus de la deuxième plate-forme, redescend au palan multiplicateur *C*, sur lequel il s'enroule, pour venir s'attacher au point fixe *c*; le train *D* du palan est fixe; le train *E* roule sur une voie *F*; il est solidaire du piston hydraulique *G*, qui se meut parallèlement à cette voie; le piston *G* agit toujours par traction.

Le poids de la cabine est partiellement équilibré par un contrepoids *H*, roulant sur une voie spéciale, disposée dans la partie basse de la voie *BB* entre les rails de cette voie; le déplacement du contrepoids est multiplié par le palan *J*, composé de deux trains, l'un fixe *K*, l'autre *L* mobile et attaché au chariot-contrepoids; le faisceau 2 s'élève, à partir de la cabine, jusqu'à la poulie *b*, redescend pour s'enrouler sur le palan multiplicateur, et enfin s'attacher en *d* au chariot-contrepoids.

La cabine pèse 11,000 kilogrammes; elle peut contenir 40 voyageurs, soit un poids d'environ 3,000 kilogrammes; la vitesse en route est de 2 mètres par seconde. Le service se fait à raison de douze voyages par heure, aller et retour, pour le parcours direct du sol au deuxième étage, et de sept à huit voyages lorsqu'il y a arrêt au premier étage; la voie de la cabine fait avec le plan horizontal un angle de 54° 35′ dans le bas et de 78° 9′ dans le haut; la longueur du parcours est de 128 m. 40.

Le cylindre hydraulique *G* est incliné de 61° 20′ sur l'horizon; le diamètre du piston est de 965 millimètres et sa course de 10 m. 70; le palan *C* multiplie dans le rapport de 1 à 12, c'est-à-dire que chacun des trains *DE* se compose de six poulies.

Le chariot-contrepoids *H*, chargé de gueuses de fonte, pèse 25,000 kilogrammes; sa voie est parallèle à celle de la cabine; le palan *J* a un rapport de multiplication égal à 3; la course du contrepoids est de 42 m. 80.

Le faisceau 1 se compose de quatre câbles en fils d'acier de 20 millimètres, présentant ensemble une section métallique de 752 millimètres carrés et travaillant au maximum à raison de 14 kilogrammes par millimètre carré dans les parties rectilignes; il s'enroule sur des poulies de 1 m. 52 de diamètre.

Le faisceau 2 se compose de deux câbles en fils d'acier, de 32 millimètres, travaillant à 13 kilogrammes par millimètre carré dans les parties droites; les poulies sur lesquelles il s'enroule ont 1 m. 165 et 1 m. 850 de diamètre.

Sur le schéma (fig. 262) on a supprimé les nombreuses poulies de support et de guidage, qui servent à maintenir les faisceaux de câbles sur leurs voies.

La figure 263 représente la cabine; comme la voie sur laquelle elle circule a des inclinaisons variées, le plancher de la cabine est disposé de manière à être horizontal dans sa position moyenne; on voit sur la figure le chariot qui roule sur la voie, et la charpente métallique qui sert de support aux caisses.

Le cylindre hydraulique est représenté par la figure 264. Le piston *A* porte deux tiges, traversant le fond supérieur à l'aide de presse-étoupe; ces deux tiges, de 110 milli-

mètres de diamètre et de près de 12 mètres de longueur, étant exposées à fléchir, sont soutenues par deux patins, l'un *B* intérieur au cylindre et glissant sur sa paroi, l'autre *C*, circulant sur une glissière fixe et réuni au premier par la tige *D*, qui traverse un presse-étoupe; ce système est rencontré à la montée par le piston, à la descente par le

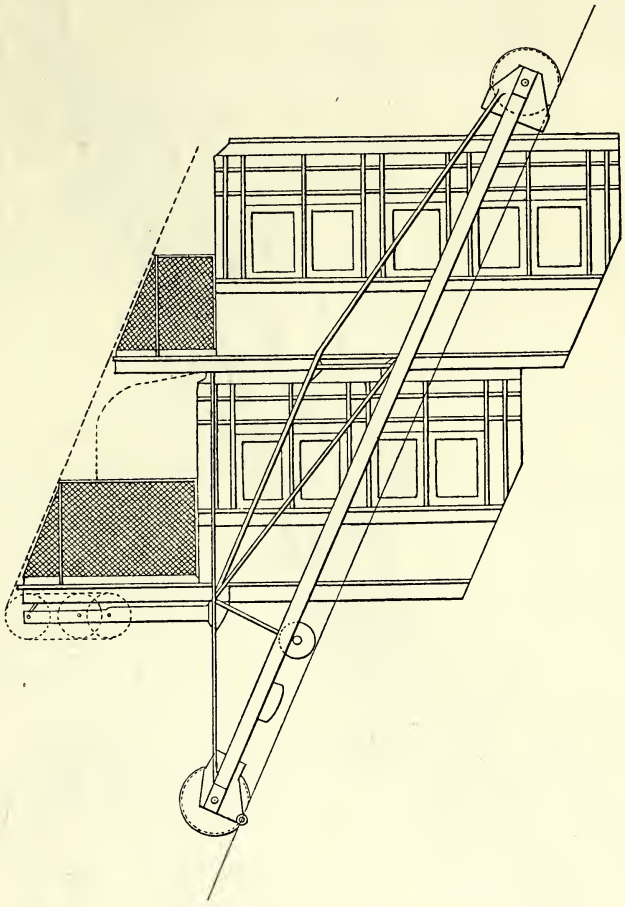


Fig. 263. — Cabine de l'ascenseur Otis.

chariot du piston, et voyage ainsi d'une demi-course à chaque excursion du piston. En *E* est le distributeur; il est actionné par un servo-moteur, sur lequel agit un câble de manœuvre traversant la cabine et mis entre les mains des agents du service.

Le chariot formant train mobile du palan moteur est représenté fig. 265. On voit en *AA* les deux tiges du piston moteur rattachées au chariot par un palonnier.

Les précautions les plus sérieuses ont été prises pour garantir la sécurité de fonctionnement de cette gigantesque machine. Des contre-rails s'opposent au soulèvement des divers mobiles. Les attaches des câbles se font sur palonniers avec tendeurs, de manière à assurer une répartition régulière des charges; des escaliers et plates-formes fixes et mobiles permettent un entretien soigné et des inspections multipliées. Des parachutes sont installés, qui assurent l'arrêt de la cabine en cas de rupture ou d'allonge-

C. F. E

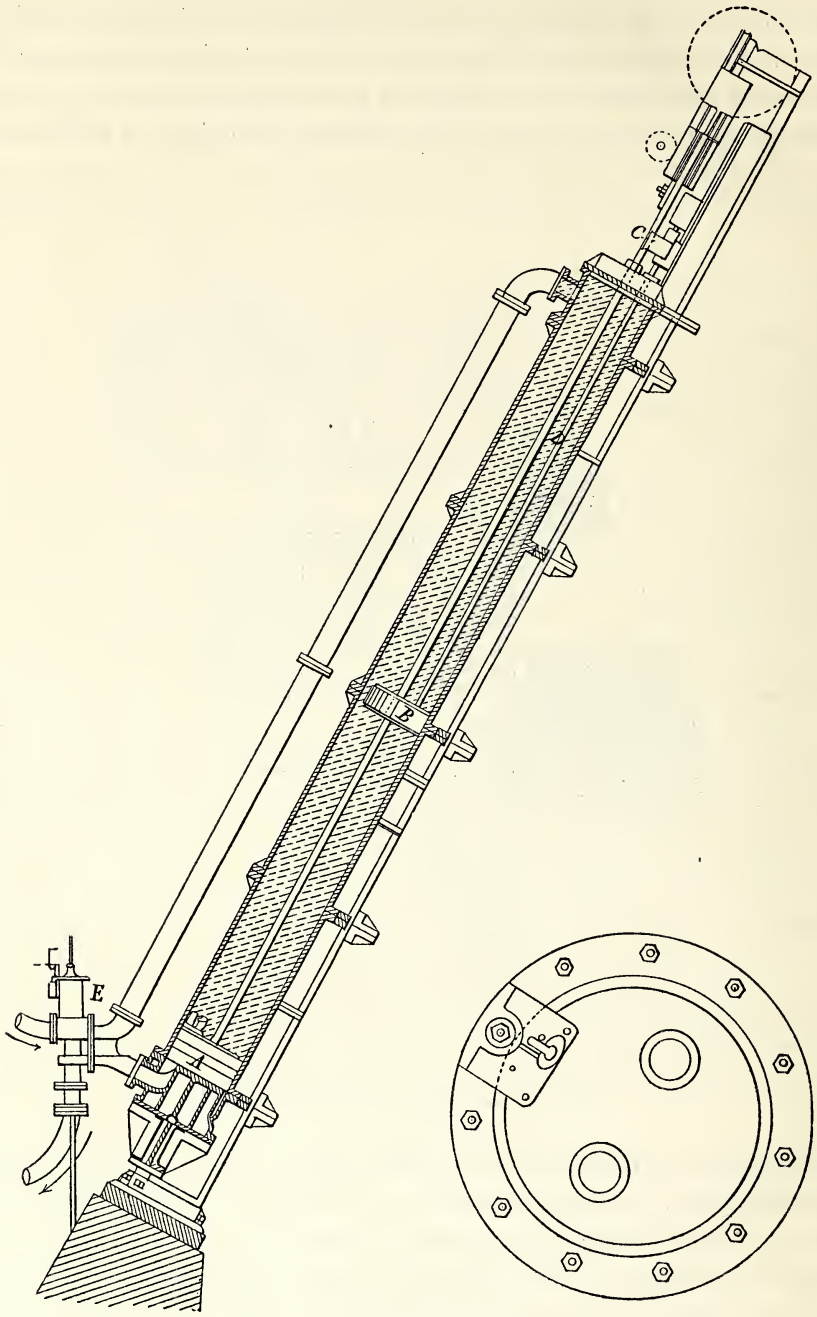


Fig. 264. — Cylindre moteur de l'ascenseur Otis.

ment des câbles; les excès de vitesse sont réprimés par un frein à force centrifuge, etc. La pression est donnée par un réservoir installé au deuxième étage, et auquel l'eau est fournie par une usine élévatoire établie dans les fondations du pilier Sud.

Les deux ascenseurs Otis n'ont cessé de fonctionner régulièrement et sans incident pendant la durée de l'Exposition.

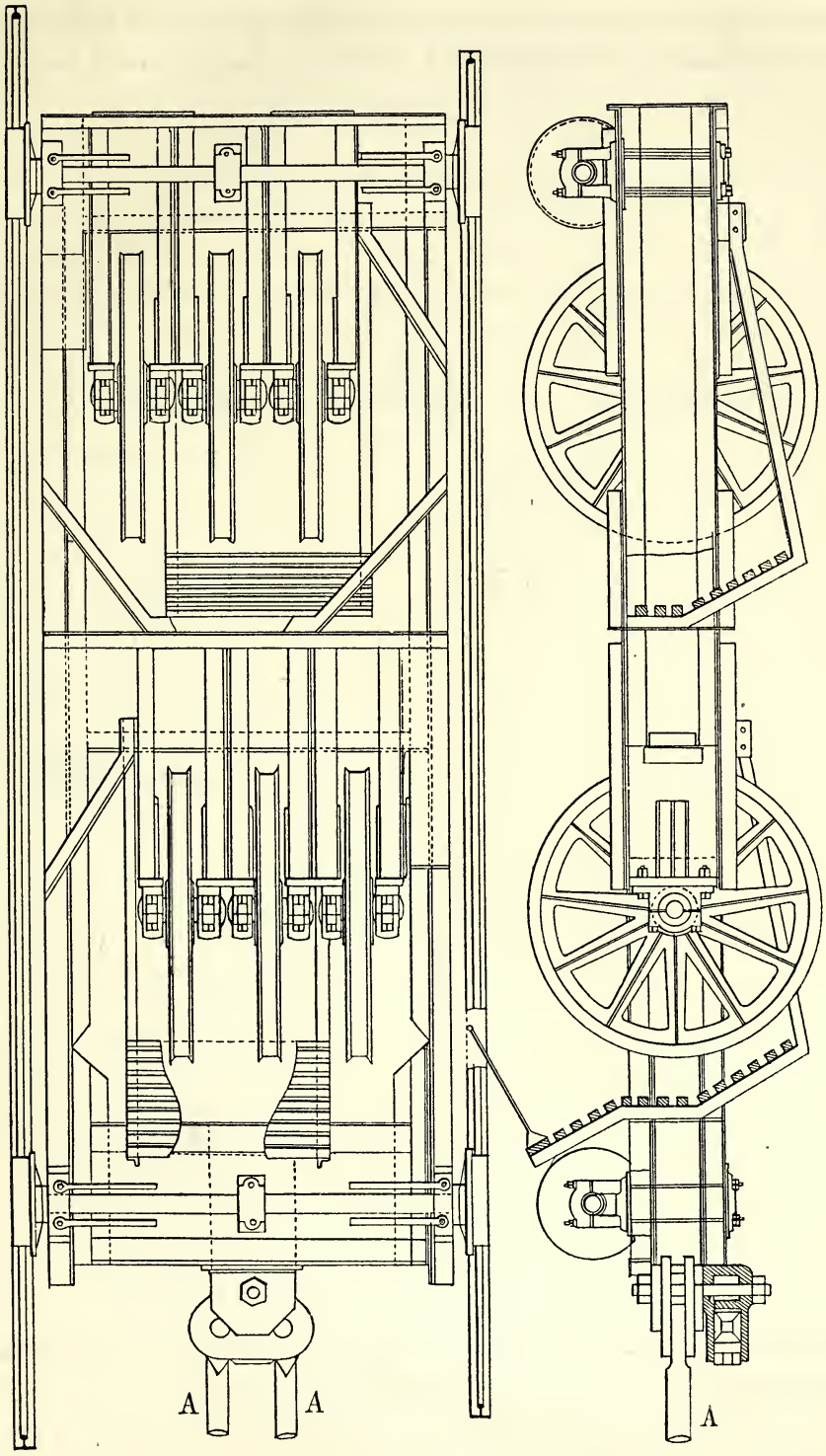


Fig. 265. — Train mobile du piston moteur de l'ascenseur Otis.

tringles à angle droit; chacune de ces tringles agit sur un rhéostat à liquide dont elle fait varier la résistance; les courants qui traversent ces rhéostats sont envoyés chacun par un fil dans les deux électro-aimants du récepteur.

Ceux-ci font mouvoir des armatures sollicitées par des ressorts antagonistes puissants, à angle droit l'une sur l'autre; chacune porte une fourchette dans son prolongement; un tube capillaire traverse le carré formé par l'intersection des deux fourchettes et laisse une trace sur un papier qui se déroule avec une vitesse de 4 millimètres par seconde.

Ces appareils, comme leurs prédécesseurs, n'ont qu'un faible rendement et n'ont jamais fait l'objet d'une exploitation suivie.

A titre historique, les appareils autographiques, l'un électro-magnétique de Meyer, l'autre électro-chimique de d'Arlincourt, qui ont tous deux fonctionné avec succès, étaient exposés au Pavillon de l'Administration française.

TRANSMISSION SUR LES CÂBLES SOUS-MARINS.

L'appareil de réception pour les grands câbles sous-marins est toujours le siphon recorder de sir William Thomson; à l'électrisation de l'encre du siphon, M. Cuttris a substitué un mouvement vibratoire de ce dernier. L'extrémité du tube en verre porte une petite pointe tirée d'un fil de fer très fin et séparée de l'armature d'un électro-aimant par l'épaisseur du papier; l'électro-aimant est excité à intervalles réguliers par un trembleur; le siphon vibre à l'unisson et trace sur la bande une ligne formée d'une série de points très rapprochés.

Pour la transmission, on est arrivé sur le câble de Marseille à Alger, duplexé par la méthode de M. Ailhaud, à transmettre de 600 à 650 émissions de courant dans chaque sens, ce qui dépasse la vitesse de manipulation que peut pratiquement soutenir un employé pendant quelques heures. MM. Belz et Brahic ont adapté la transmission automatique de l'appareil Wheatstone à ce service.

L'appareil n'ayant à transmettre que des points placés à droite ou à gauche de la ligne centrale, le perforateur ne porte que trois poinçons. Le transmetteur actionne un relais Froment monté en inverseur de courant, qui émet les courants envoyés au câble. Deux leviers coudés montés sur le même axe sont en relation d'un côté avec les aiguilles, de l'autre avec deux vis butoirs, contre lesquels des ressorts tendent constamment à les appliquer; ces leviers solidaires des aiguilles sont actionnés par une cheville unique fixée sur le balancier. Une pile locale positive est reliée au massif de ce transmetteur qui envoie le courant tantôt dans l'une, tantôt dans l'autre paire des bobines du relais. Les deux pôles de la pile de ligne communiquent : l'un avec les deux butoirs supérieurs, l'autre avec les deux butoirs inférieurs entre lesquels se meuvent les palettes mobiles du relais; l'une de ces palettes communique avec la terre, l'autre avec le câble.

Sur ce même câble, relativement court (494 milles, 5,390 ohms et 12 microfarads), M. Mandroux, après la mort de M. Ailhaud, essaya l'emploi de l'appareil Hughes. Au départ, le câble est en communication avec un frotteur calé à l'extrémité de l'arbre des cames, et qui se meut sur un distributeur; chaque fois que le chariot rencontre un goujon soulevé, ce frotteur effectue une révolution; son jeu, combiné avec celui d'une came et d'un levier de transmission, détermine successivement :

1° L'isolement du câble pendant un temps très court, mais suffisant pour atténuer l'effet des courants telluriques;

2° La charge, par une pile de quinze éléments, d'un condensateur dont une armature est reliée au câble et produit le signal;

3° La mise à la terre d'abord à travers une résistance, puis directement;

4° La mise en communication du câble avec un galvanomètre Thomson, qui indique si la ligne est bien déchargée, ou s'il convient de modifier le réglage pour y arriver.

A la réception se trouve le relais dont il a été fait mention plus haut et dont l'armature, au lieu d'établir un contact sous l'action du courant de ligne, rompt au contraire le circuit d'une pile locale, dont une dérivation, dans la position de repos, passe d'une manière permanente dans l'électro-récepteur; le plus petit mouvement de l'armature produisant un mauvais contact augmente l'intensité dans ce récepteur, et l'action est immédiate, l'armature n'ayant pas à se déplacer d'une manière appréciable pour que le récepteur soit actionné.

Ce système, intéressant en ce qu'il permet d'utiliser le hughes sur des lignes d'une grande capacité, a fonctionné pendant deux ans sur les lignes franco-algériennes, mais son rendement est inférieur à celui du siphon recorder, et il a été abandonné.

MANIPULATEUR DE L'EASTERN C°.

L'Eastern C° emploie la double clef de M. Saunders, qui permet de contrôler au départ les dépêches transmises. Cette clef se compose de deux leviers Morse accouplés, dont l'extrémité postérieure porte un ressort en acier, isolé du levier principal par une feuille d'ébonite, et mobile entre deux vis butoirs. L'abaissement d'une touche envoie le courant de la pile de ligne sur le condensateur, et en même temps le courant de même sens émanant d'une pile locale dans un récepteur à double armature polarisée, tandis que l'abaissement de l'autre touche envoie un courant de sens contraire, et sur le conducteur et sur le récepteur, dont la seconde armature est attirée; chacune des armatures agit sur une des molettes d'un appareil imprimeur double; les deux molettes impriment sur deux lignes parallèles une série de traits qu'on lit dans l'alphabet des bandes perforées de Wheatstone.

La charge à droite comprend les poids ci-après :

63 voyageurs	4,000 kilogr.
160 mètres de longueur de câble, et, comme il y a 4 câbles : $4 \times 160 \times 20 =$	12,800
Ajoutons les frottements	2,400
TOTAL	19,200

Il faut donc que le poids x des pistons et de leur attirail soit de 19,200 kilogrammes.

2° Les deux cabines sont au niveau de la plate-forme intermédiaire; mais F est vide

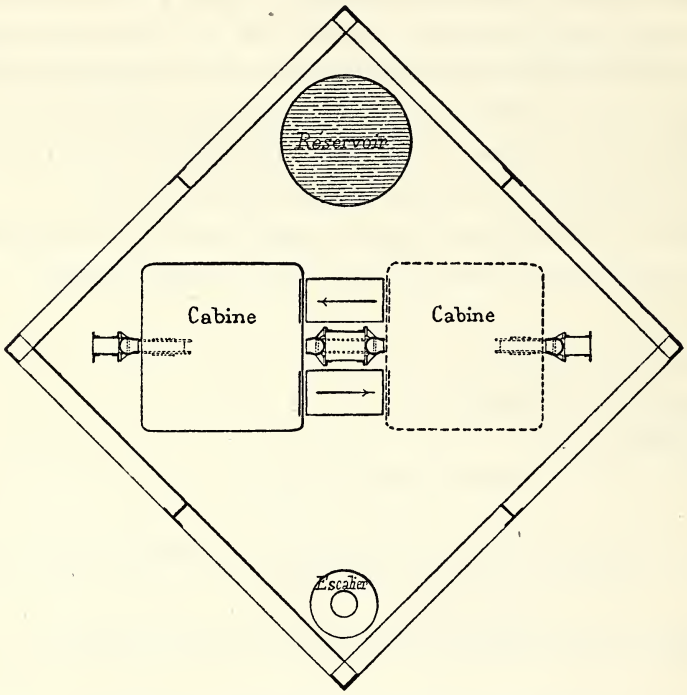


Fig. 267. — Ascenseur Edoux. Plate-forme intermédiaire.

et E chargée de voyageurs montants. Les cabines et les câbles se font équilibre. La force nécessaire pour produire le mouvement se calcule comme il suit :

Poids des plongeurs	19,200 kilogr.
Poids des voyageurs dans la cabine E	4,000
Frottements	2 400
TOTAL	25,600

Cet effort est donné par la pression de l'eau s'exerçant sous la face inférieure des plongeurs, et correspondant à une colonne d'environ 160 mètres de hauteur, soit 16 kilogrammes par centimètre carré. L'aire pressée étant de 1,600 centimètres carrés, la poussée sera précisément de 25,600 kilogrammes.

Pour 1 mètre de parcours, cette poussée diminuera de 160 kilogrammes; mais la prépondérance des brins de droite des câbles augmentera d'un poids correspondant à 2 mètres de ces câbles, soit, pour les quatre câbles, de 160 kilogrammes. Par suite, les conditions d'équilibre resteront permanentes pendant toute la durée du mouvement.

La solution dont nous venons d'esquisser les principaux traits ne laissait pas que de soulever une multitude de questions délicates. Il fallait, en premier lieu, répartir également la charge entre les câbles; c'est l'objet des deux balanciers *aa* et *bb*, dont l'action est complétée par des tendeurs à vis adaptés aux points d'attache. Ces balanciers remplissent une autre fonction : ils donnent au guidage des cabines l'indépendance nécessaire pour éviter les coincements. D'autre part, il est difficile de faire marcher d'accord deux pistons portant une même charge; la moindre inégalité dans la répartition des efforts, des pressions ou des frottements suffit pour donner de l'avance à l'un des pistons. La disposition représentée supprime cette difficulté : les câbles 1 et 2, qui s'attachent, d'une part, aux plongeurs *M* et *M'*, sont, d'autre part, amarrés directement sur la cabine *F*; le guidage de cette cabine assure le parallélisme dans la marche des plongeurs.

Mais pourquoi ne pas se contenter, comme dans les ascenseurs ordinaires, d'un seul plongeur au lieu de deux? Géométriquement, la chose était facile; au cas actuel, c'eût été déplorable. Le constructeur a finement analysé les données qui étaient imposées, et y a appliqué les dispositifs les plus efficaces. Un long plongeur de 80 mètres, exposé aux vents violents qui règnent dans les parties hautes de la tour, eût pris des flèches importantes et fouetté d'une façon dangereuse. Les deux plongeurs latéraux sont guidés dans toute leur longueur par des glissières attachées à des armatures rigides, fixées elles-mêmes à la charpente de la tour. Ces glissières sont fendues latéralement, pour laisser passer le balancier qui repose sur la tête des plongeurs.

Voici quelques indications complémentaires sur les détails de construction.

La figure 267 représente le plan de la plate-forme intermédiaire, les deux cabines étant supposées au niveau de cette plate-forme; chaque cabine est munie de deux portes sur la paroi qui fait face à la cabine opposée. Les voyageurs circulent en prenant leur droite, et le transbordement se fait avec ordre et rapidité.

Les plongeurs travaillent à la tension pendant la descente sur presque toute leur hauteur; ils sont en tôle d'acier rivée, avec manchons vissés sur 60 mètres de longueur; le bas, sur 20 mètres environ, est en fonte.

Les corps de presse, de 380 millimètres de diamètre extérieur, sont également en tôle d'acier rivée; les divers segments sont réunis par des manchons filetés.

Les câbles sont plats, en fils d'acier; la charge qu'ils supportent dans les parties droites correspond à un effort maximum de 2 kilogrammes par millimètre carré.

L'eau consommée par l'ascenseur est fournie par une machinerie spéciale. L'usine élévatoire est installée dans les fondations du pilier Sud de la tour. Elle comporte deux

pompes Worthington, chacune à deux cylindres à vapeur disposées en tandem et travaillant en compound. Ces pompes prennent l'eau dans la bâche établie sur la plate-forme intermédiaire et la refoulent dans le réservoir du troisième étage; la pression dans la conduite d'amenée à la pompe est d'environ 220 mètres d'eau, et, dans la conduite de refoulement, de 300 mètres.

L'appareil que nous venons de décrire a fonctionné régulièrement et sans incident depuis le jour où il a été mis en service. Pendant la durée de l'Exposition, il a transporté souvent plus de 4,000 voyageurs par journée de 8 heures.

Nous avons donné précédemment un aperçu des dispositions qui ont été adoptées pour assurer la distribution de la puissance motrice aux divers exposants répartis sur la vaste surface de la galerie des Machines. Quatre lignes de supports, constitués par des portiques en fonte, courent dans toute la longueur de la galerie; ces portiques sont couronnés par de vigoureuses poutres, à section triangulaire, qui, par leur base, soutiennent les chaises auxquelles sont suspendus les arbres de la transmission. Sur le sommet de chacune de ces quatre poutres est installé un rail; la galerie des Machines est ainsi parcourue, dans le sens de sa longueur, par deux voies ferrées de 18 mètres de largeur, suspendues à 7 mètres au-dessus du sol. Sur chacune de ces voies circule, d'un bout à l'autre de la galerie, un pont roulant mû mécaniquement.

Ces ponts roulants ont été établis et exploités, l'un par MM. Bon et Lustremant, l'autre par MM. Mégy, Echeverria et Bazan, de Paris. La portée de chaque pont, comme on l'a vu, est de 18 mètres; le parcours est de 328 mètres; ils pouvaient lever une charge de 10 tonnes au crochet, et lui donner le mouvement en hauteur et dans les deux directions horizontales, parallèle et perpendiculaire à la voie. La commande était électrique. Pendant la période préparatoire, ainsi qu'après la fin de l'Exposition, ces ponts rendirent les plus grands services pour la manutention, la mise en place et l'enlèvement des grosses pièces de machines. Pendant la durée de l'Exposition, ils reçurent une plate-forme et transportèrent, moyennant une faible rétribution, de nombreux visiteurs d'un bout à l'autre de la galerie, voyage commode, agréable et plein d'intérêt, qui était fort goûté du public. Aux extrémités des voies se dressaient des pylones, qui supportaient des plates-formes formant salles d'attente; on accédait à ces plates-formes par des escaliers et des ascenseurs.

La charpente de ces ponts était formée de deux grandes poutres transversales en tôle et cornières, portant la voie du treuil roulant; deux autres poutres plus légères, reliées par des consoles aux deux premières, supportaient les trottoirs; enfin de solides sommiers disposés aux deux bouts du pont, parallèlement à la voie principale, reposaient sur les galets roulant sur cette voie. A une des extrémités étaient réunis les divers mécanismes. Pendant le service pour voyageurs, le vide entre les deux poutres principales était couvert par un plancher se raccordant à niveau avec les deux trottoirs, de manière à constituer une grande plate-forme de 5 mètres de largeur.

Le pont Bon et Lustremant était desservi par une dynamo Gramme donnant, à 700 tours par minute, 48 ampères sous 300 volts; elle était mise en mouvement par une machine Westinghouse de 25 chevaux, alimentée par une chaudière Petry-Chaudoir; cette petite usine était installée dans la cour de la force motrice; elle envoyait le courant par des câbles disposés le long des rails et reposant sur des isolateurs; un crochet métallique isolé, fixé au pont, soulevait légèrement le câble à son passage et servait ainsi de prise de courant; le courant était renvoyé par des câbles à une réceptrice, qui actionnait, par friction plate, un arbre sur lequel se faisait la prise des trois mouvements, au moyen de cônes de friction. Les leviers de commande des trois mouvements étaient réunis dans une cabine suspendue au-dessous des poutres du pont.

La vitesse du pont en service pour voyageurs était d'environ 0 m. 52 par seconde; il faisait en moyenne 24 voyages par jour; il a parcouru, pour ce service, 1,350 kilomètres, et en outre 150 kilomètres pour les manutentions.

Le pont roulant construit par MM. Mégy, Echeverria et Bazan ressemblait beaucoup, dans ses dispositions générales, à celui que nous venons de décrire. La petite usine qui fabriquait l'énergie comportait une machine à vapeur et une dynamo. La machine à vapeur est du système Mégy; à la vitesse de 220 tours, elle fait 20 chevaux; la dynamo est du système Miot, à 4 pôles en série, donnant 10,000 watts à 550 tours. Sur le pont était installée une dynamo-réceptrice, recevant le courant par deux fils en bronze phosphoreux de 6,5 millimètres de diamètre. Toutes les manœuvres se faisaient par engrenages simples, avec interposition de l'embrayage élastique du système Mégy, ce qui supprimait complètement les chocs et donnait à l'appareil une douceur de marche fort remarquable. La plate-forme, de 22 mètres sur 5 mètres, recevait facilement 150 voyageurs. La vitesse en service normal était de 0 m. 60 par seconde; on a pu, lors des essais, pousser cette vitesse jusqu'à 1 m. 10 avec une charge de 6,000 kilogrammes au crochet. La durée du trajet était de 11 minutes environ, et le pont faisait 125 voyages par jour. Il a effectué, tant pour le service de la manutention que pour le transport des visiteurs, un parcours d'environ 1,800 kilomètres.

Pour clore l'étude des appareils servant à la manœuvre des fardeaux, nous donnerons la description sommaire d'un appareil remarquable aussi bien par l'élégance de ses dispositions que par les excellents résultats qu'il a fournis en service. Il s'agit de la grue étudiée et construite par M. E. Guyenet pour l'élévation et la pose des pièces entrant dans la constitution de la tour de 300 mètres. Le problème à résoudre était des plus compliqués : il ne pouvait être question de procéder comme on le fait dans les constructions ordinaires, c'est-à-dire de se procurer des points d'appui au moyen d'échafaudages provisoires. L'appareil élévatoire devait s'attacher aux parties de la tour déjà construites, et élever au-dessus de ses points d'attache les éléments entrant dans la construction des parties supérieures; puis, ces éléments une fois assemblés, l'appareil

devait se ripper de lui-même, pour opérer à une élévation plus grande. C'est ainsi que, de proche en proche, la machine avait à se hisser, en suivant la marche ascensionnelle des travaux de montage, sans jamais être en avance ni rester en retard sur eux, et en préparant toujours au-dessus d'elle-même la voie sur laquelle elle devait ensuite se déplacer et se fixer.

Cette voie était placée dans les piliers de la tour. Ce qui compliquait beaucoup la question, c'est que ces piliers ne sont pas rectilignes; dans le bas, ils sont fortement inclinés pour se redresser progressivement jusqu'au haut de la tour, ce qui obligeait l'appareil à s'accommoder à ces inclinaisons variables.

L'appareil a été construit pour manœuvrer des poids pouvant atteindre 3,000 kilogrammes; la portée variait de 5 m. 50 à 12 mètres; l'orientation était totale, permettant ainsi de desservir la surface d'un cercle de 12 mètres de rayon, c'est-à-dire d'atteindre tous les points du plan de pose d'un montant.

La figure 268 représente cet appareil. *AA* sont les longerons destinés ultérieurement à porter la voie des ascenseurs, et qui ont été utilisés comme voie pour les déplacements de la grue. Un châssis *BB*, boulonné sur cette voie, sert de fondation à la grue; c'est ce châssis qui doit s'élever successivement, par des procédés qui seront décrits ci-après. Au sommet du châssis *BB* s'articule une charpente métallique *C*, présentant, dans son ensemble, la forme d'une hotte; la pointe inférieure de la hotte porte la crapaudine de la grue; sa base supérieure *R* constitue une plate-forme, percée à son centre d'un trou, qui forme le cercle de roulement de la grue.

Celle-ci se compose d'un pivot *DD* et d'une flèche *L*. Le pivot, forte poutre métallique, est soutenu dans le bas par la crapaudine fixée dans la pointe de la hotte, et à mi-hauteur par le cercle de roulement pratiqué dans la plate-forme *R*. La flèche *L* reçoit la poulie sur laquelle passe la chaîne de levage; elle est soutenue par les haubans *M*.

L'appareil étant disposé pour le service, la plate-forme *R* est horizontale, le pivot *DD* est vertical. Les pièces à lever sont suspendues au crochet *S*; la chaîne, après avoir passé sur la poulie qui garnit la tête de la flèche *L*, revient au treuil *Q*, lequel est manœuvré par des hommes placés sur la plate-forme. Le mouvement d'orientation est opéré par le treuil *P*; puis le fardeau est descendu en place et déposé avec précision au point voulu, à l'aide d'une vis de rappel dont est munie la douille du crochet *S*.

Pour faire varier le rayon du cercle desservi, on agit sur les haubans *M*. Ces haubans sont articulés sur l'axe d'un petit chariot *N*, roulant sur le dos du pivot; en élevant ce chariot, on augmente la portée de la grue, et inversement; le déplacement du chariot *N* est obtenu par la vis *O*, laquelle est manœuvrée par les manivelles *P*, avec interposition d'un embrayage.

Le pivot *DD* de la grue doit rester constamment vertical, malgré l'inclinaison variable des longerons *A*; on obtient ce réglage en faisant pivoter la hotte *C* autour de son articulation supérieure, au moyen de la vis *E*, qui agit sur la pointe inférieure de cette hotte.

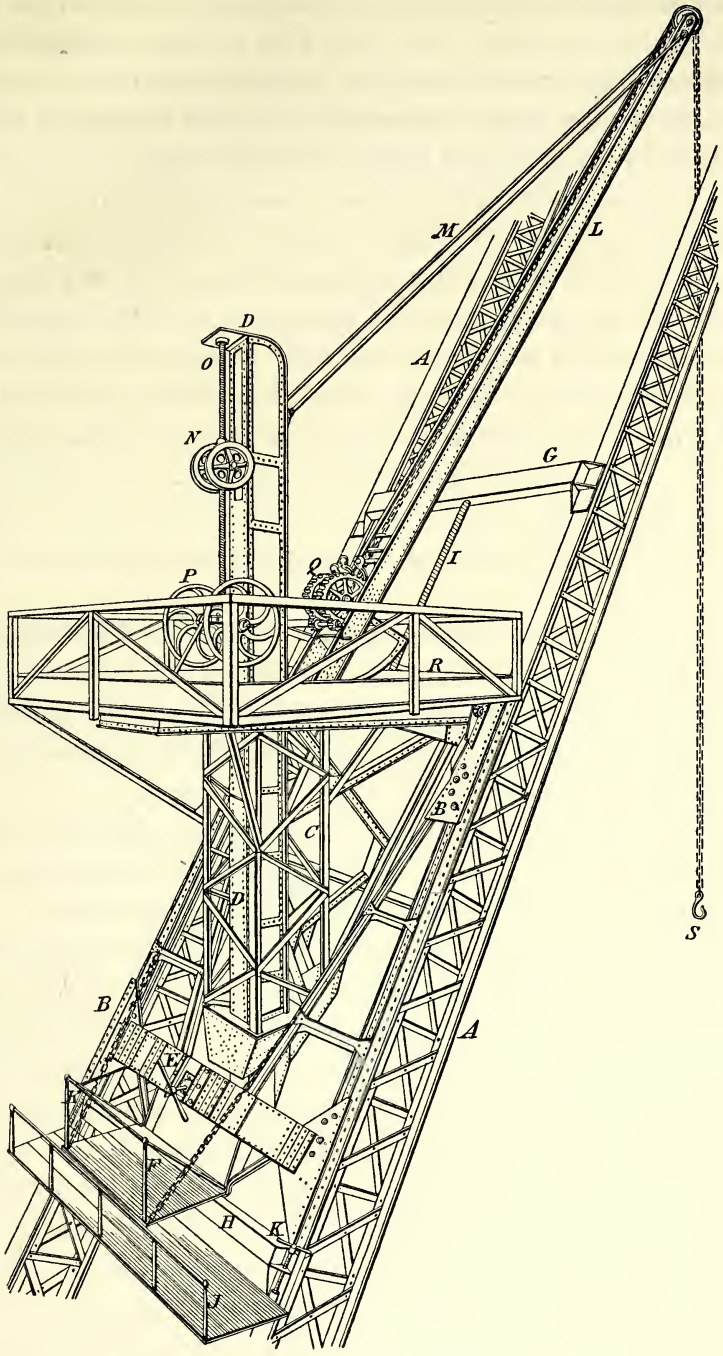


Fig. 268. — Grue Guyenet pour le montage de la tour Eiffel.

Lorsque, à l'aide de la grue, on a mis en place et monté une hauteur suffisante de la tour et des poutres de support *AA*, il s'agit de hisser l'appareil, afin de poursuivre le montage à une plus grande hauteur. Ce mouvement s'opère à l'aide de la grosse vis de

IMPRIMERIE NATIONALE.

relevage *I* (60 millimètres de diamètre au noyau); cette vis, manœuvrée à l'aide d'un cliquet, va du sommier supérieur du bâti *BB* à un deuxième sommier *G*. Le bâti *BB* étant boulonné sur les longerons *A*, on peut, en agissant sur la vis de relevage, élever le sommier *G*; lorsque la distance voulue est atteinte, on boulonne le sommier *G*, on démonte les boulons qui assemblent le bâti *BB* sur les longerons *AA*, et alors on peut hisser tout le système, en agissant sur la vis *I*, qui prend appui sur le sommier *G* : c'est un véritable mouvement de reptation, les parties *G* et *R* étant successivement fixes et mobiles, s'éloignant et se rapprochant alternativement l'une de l'autre. Pour éviter les graves accidents qu'une rupture eût pu entraîner, on a doublé l'appareil de hissage : au-dessous du châssis *BB* se trouve un deuxième sommier *H*, mobile également, et portant à ses extrémités des vérins *K*, *K*, dits *vérins de sécurité;* pendant le hissage, des hommes mis à ces vérins suivent le mouvement ascendant du châssis en maintenant la tête des vérins en contact avec la base du châssis. La course de ces vérins étant faible (0 m. 50), il faut plusieurs reprises pour un déplacement entier de l'appareil. Ce déplacement comportait une hauteur de 2 m. 50, mesurée parallèlement aux longerons *AA*.

Sur la plate-forme *R* sont installés les hommes appliqués à l'élévation des fardeaux, à l'orientation de la grue, aux mouvements du chariot *N* et à la manœuvre de la vis de relevage *I*. L'ouvrier chargé de ramener le pivot *DD* à la verticale manœuvre la vis *E*, en se tenant sur la petite plate-forme *F*. Enfin, une troisième plate-forme *J* reçoit les hommes préposés aux vérins de sécurité *K*.

Quatre grues pareilles ont été affectées au montage des piliers de la tour, une grue par pilier. C'est à l'aide de ces machines qu'ont été élevées et mises en place toutes les pièces constitutives des piliers, jusqu'à la hauteur du deuxième étage.

A partir du deuxième étage, le système de construction de la tour change complètement; les quatre piliers, jusque-là séparés, se réunissent en un seul ayant la forme d'un tronc de pyramide; les chemins de roulement des ascenseurs inférieurs n'existent plus; ils sont remplacés par une seule poutre verticale, occupant l'axe de la tour.

Deux grues seulement ont été maintenues en service pour le montage de cette partie haute; elles prenaient attache sur la poutre verticale, dont il vient d'être parlé. Cette poutre n'offrait pas des tables assez larges pour que l'appareil pût s'y adapter; on y a suppléé en adaptant sur ces tables des cadres provisoires, convenablement consolidés et entretoisés. La largeur des cadres, correspondant à la voie de la grue, était de 3 m. 80, leur hauteur de 3 mètres; un jeu de trois cadres, soit une longueur de 9 mètres, se montait d'un coup; deux jeux pareils, disposés de part et d'autre de la poutre centrale, servaient à l'amarrage des deux grues en service, lesquelles s'élevaient parallèlement, en se faisant équilibre, de part et d'autre de la poutre verticale.

Les grues Guyenet ont servi pour le montage de toutes les pièces de la tour, à partir du point où les chèvres ordinaires, posées sur le sol, sont devenues impuissantes. Elles ont répondu de la manière la plus parfaite aux conditions multiples d'un service dur

et difficile. L'une de ces grues, descendue des hauteurs de la tour, était exposée dans le palais des Machines.

Si les simples curieux passaient avec indifférence devant cette exposition d'apparence modeste et un peu fruste, les hommes du métier ne cessaient d'admirer et d'étudier, dans ses ingénieux détails, le vaillant outil qui avait fait de si bonne et si rude besogne.

CHAPITRE X.

MESURE DU TRAVAIL ET DE LA FORCE.

SECTION I.

APPAREILS DE PESAGE.

SOMMAIRE.

Généralités.
Expositions de Trayvou, de Pruvost-Delos, de Sallé, de Roche. — Bascule vérifiable de Guillaumin (Société de construction des ponts et bascules). — Bascule numéroteuse de Chameroy. — Bascule électrique de Snelgrove (Avery).

Les appareils de pesage étaient amplement représentés dans les galeries de l'Exposition de 1889. Toutefois, l'étude que nous avons à en faire ne comporte que des développements restreints. La raison en est que, comme beaucoup d'autres, les industries du pesage tendent à se spécialiser. Le pesage prend de plus en plus les caractères d'une opération de manufacture; dans toute usine un peu importante, toutes les matières, premières ou fabriquées, sont soumises à la pesée; un personnel spécial en est chargé, et des outils de pesage sont établis de manière à donner, au meilleur marché possible, des pesées rapides et exactes. C'est dire que chaque bascule, chaque balance présente des dispositions particulières, étudiées en vue de l'opération qu'elle doit indéfiniment répéter. Chaque industrie a ainsi ses appareils de pesage qui lui sont propres : ceux destinés aux chemins de fer ne sont pas les mêmes que ceux dont on se sert dans les manufactures de tabac, dans les laboratoires de physique ou de chimie, etc. Il ne reste à la mécanique générale que les outils omnibus, qui peuvent être utilisés indifféremment dans plusieurs industries variées; ce sont les seuls que nous ayons à étudier ici, et la nomenclature n'en est pas bien étendue.

La maison B. Trayvou, à la Mulatière, près Lyon (Rhône), est une des plus anciennes et des plus réputées dans la fabrication des instruments de pesage. Elle fut fondée, en 1827, par Joseph Béranger; sous l'impulsion de ce maître et de ses successeurs, elle prit une part active aux progrès qu'a réalisés l'art du balancier. Béranger contribua dans une large mesure à rendre pratique la balance si ingénieuse de Roberval et à en répandre l'usage. Depuis 1865, ces importantes usines sont entre les mains de M. Trayvou, qui a suivi avec succès la voie inaugurée par ses prédécesseurs.

L'exposition des usines de la Mulatière comporte un grand nombre d'outils de toutes

puissances, adaptés aux usages les plus variés, et qui, tous, portent ce cachet d'ingéniosité et d'excellente exécution qui est une des marques de la maison. Citons-en quelques modèles.

Comme balance de comptoir, la série est fort complète et comporte, soit des balances ordinaires, soit des balances du système Roberval, avec des perfectionnements sérieux, qui améliorent la rapidité et la précision des pesées.

Les bascules exposées ont des puissances allant de 100 kilogrammes à 50 tonnes. Les petites bascules sont des instruments précis, sortes de romaines pouvant, dans beaucoup de cas, remplacer les balances, et donnant des pesées très rapides. Parmi les bascules de grande puissance, il convient de mentionner une bascule en l'air, appareil qui permet de lire le poids d'un fardeau, tandis qu'il est suspendu au crochet d'une grue ou d'un pont roulant.

Signalons encore le *peso-mesureur,* spécialement destiné au mesurage des grains et des liquides; le poids mobile est constitué par un vase de capacité déterminée, que l'on remplit de liquide ou du grain à mesurer; des dispositions simples assurent, la tare une fois faite, l'équilibrage permanent du vase mobile et du récipient dans lequel est versée la matière à mesurer; une simple lecture faite sur le fléau donne immédiatement le rapport des poids, et par conséquent des volumes, des quantités de matières contenues dans le vase mobile et dans le récipient.

La maison Trayvou est la première qui ait mis en circulation ces ingénieux instruments appelés *bascules automatiques,* et qui sont aujourd'hui si usitées dans les gares de chemins de fer, pour peser les bagages. L'invention de cet utile appareil est due à M. Dujour. Le poids de la charge déposée sur le plateau de la bascule est indiqué, immédiatement et sans tâtonnement, par une aiguille se mouvant sur un cadran divisé. On connaît le principe de cet appareil : le fléau de romaine des bascules ordinaires est remplacé ici par une came, sur la jante de laquelle s'enroule un ruban d'acier, supportant un contrepoids; le bras de levier du contrepoids est ainsi variable automatiquement; les déplacements angulaires du système croissent avec le poids de la charge à peser; ces déplacements sont amplifiés par un engrenage et transmis à l'aiguille mobile; en traçant convenablement le profil de la came, on arrive à rendre équidistantes les divisions du cadran correspondant à des accroissements égaux du poids du fardeau. Des dispositions ingénieuses facilitent le tarage de l'appareil et assurent l'amortissement rapide des oscillations.

Le même principe est appliqué dans ces appareils, si répandus aujourd'hui dans les lieux publics, et qui permettent à une personne de connaître son poids, en introduisant dans une fente de tirelire une pièce de 10 centimes. C'est également la maison Trayvou qui fabrique ces appareils.

Pour donner plus d'amplitude aux divisions du cadran, M. Trayvou a recours à un artifice assez fréquemment employé dans d'autres circonstances : la graduation est faite non pas sur un cercle, mais sur une spirale; l'aiguille porte un index qui se déplace

radialement à la demande de la spirale, de sorte que la graduation peut faire plusieurs circonvolutions sans amener de confusion dans les lectures.

Nous arrêterons ici cette revision rapide de l'intéressante exposition de M. Trayvou. La même maison construit des appareils dynamométriques, sur lesquels nous aurons à revenir.

M. Pruvost-Delos, de Merville (Nord), expose, entre autres objets, un pont à bascule de 10,000 kilogrammes fort bien exécuté et d'un prix modéré.

La *balance automatique* présentée par M. Sallé, de Paris, repose sur des principes analogues à ceux de l'appareil Dujour; l'auteur a introduit un perfectionnement ingénieux : l'axe de rotation de la came est creux et glisse à frottement doux sur un axe concentrique, lequel repose lui-même sur des couteaux; lorque l'équilibre s'établit, ce sont ces couteaux qui forment l'axe de suspension du système, lequel devient ainsi très libre dans ses mouvements.

Citons encore l'exposition de bascules de M. Émile Roche, ancienne maison Bailly et Roche frères, de Rennes.

Si bien établie que soit une bascule, si exacts que soient les résultats qu'elle donne lorsqu'elle sort des mains du constructeur, l'usure, les chocs, les accidents de toute nature peuvent la rendre fausse après un certain temps d'usage. D'autre part, pour peu que l'appareil soit puissant, les vérifications deviennent pratiquement impossibles, car elles exigeraient la manipulation de poids très lourds et le tarage de ces poids. L'inconvénient est grave : les pesées faites à l'aide de bascules sont frappées de suspicion, en l'absence d'un procédé pratique de contrôler l'exactitude de l'instrument.

M. Guillaumin s'est attaché à résoudre cette difficulté; il a rendu la bascule facilement vérifiable à l'aide de quelques dispositifs extrêmement simples. La figure 269 représente la romaine d'une bascule Guillaumin d'une portée de 10,000 kilogrammes. Elle comporte, comme on le voit, un système à deux fléaux gradués; le fléau supérieur est parcouru par un contrepoids Q' donnant les tonnes; le fléau inférieur porte deux contrepoids mobiles, l'un Q donnant les centaines de kilogrammes, l'autre q les kilogrammes. Les divers leviers de la romaine, ainsi que ceux qui supportent le pont, sont divisés dans le rapport du 1/10e, ce qui facilite beaucoup les opérations.

Jusqu'ici, cette bascule ne diffère pas des bascules ordinaires. Les additions apportées par M. Guillaumin sont les suivantes. Le levier inférieur BC, oscillant sur le couteau C, est prolongé en CA', et en A' est suspendue une chappe symétrique de la chappe A, sur laquelle s'attache la tringle de puissance; à cette chappe A' est fixée une coupe de tarage et un crochet pouvant recevoir des poids; la chappe A est également pourvue d'un crochet de suspension; enfin la chappe BB' porte un plateau B''.

L'appareil étant libre dans ses mouvements est nécessairement juste, si les rapports prévus des leviers (1/10e au cas actuel) ont été bien établis et conservés et si, d'autre part, les graduations des fléaux sont correctes. Il faut en premier lieu vérifier la divi-

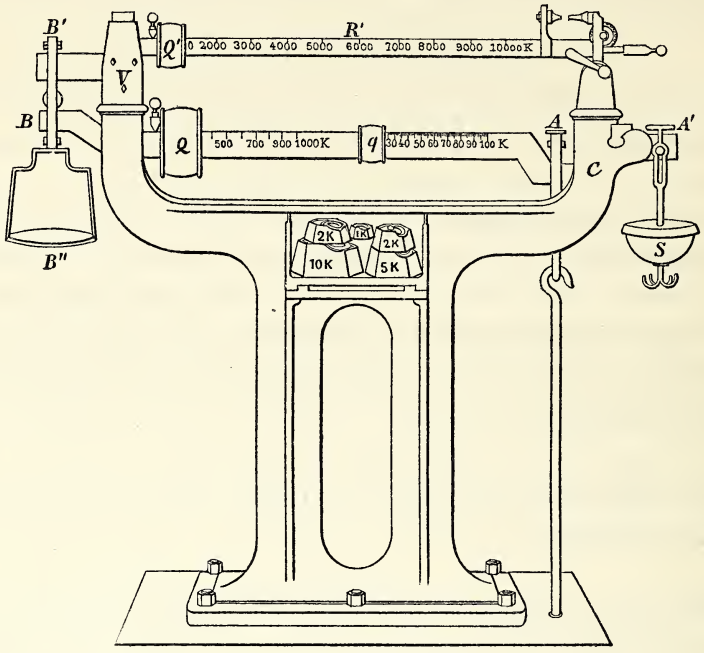


Fig. 269. — Bascule Guillaumin.

sion des leviers; on s'assure d'abord que les deux bras AC et $A'C$ sont égaux; il suffit, pour cela, une fois l'équilibre établi, d'ajouter en A et A' des poids égaux; l'équilibre doit subsister; on contrôle au besoin l'opération, comme s'il s'agissait d'une balance ordinaire à l'aide d'une double pesée ou d'une interversion des poids.

Cette vérification faite, on constate, par des poids mis en A' et en B'', que le bras CA' est le dixième de CB.

La division correcte du levier CB étant aussi contrôlée, il est facile de vérifier, de proche en proche, toutes les proportions de l'appareil, à l'aide d'une série d'opérations simples, faciles à imaginer et beaucoup plus rapides à exécuter qu'à décrire.

On remarquera que toutes ces vérifications peuvent être faites l'appareil étant en charge; c'est là un avantage important, car, ainsi que le fait remarquer très justement M. Guillaumin, les ponts à bascule sont quelquefois trop faibles pour la puissance annoncée, et la flexion des leviers peut introduire des erreurs graves.

La bascule vérifiable Guillaumin est exposée par la Société anonyme de construction des ponts et bascules, de Voiron (Isère). Cet appareil a été admis à la vérification et au poinçonnage par décision ministérielle du 25 octobre 1887; une décision ultérieure a autorisé la vérification à l'aide de poids de 10 kilogrammes.

M. Augustin Chameroy présente la bascule numéroteuse, qu'il avait déjà exposée en 1878, et qui délivre, à chaque pesée, un ticket imprimé sur lequel est inscrit le poids mesuré. L'auteur a introduit dans son appareil quelques perfectionnements intéressants.

M. Snelgrove a combiné un appareil de pesage tel, que le seul fait de déposer la charge sur le plateau suffise pour faire apparaître lisiblement la valeur du poids; c'est le problème résolu si élégamment par M. Dujour, ainsi qu'on l'a vu précédemment. Mais les moyens employés par M. Snelgrove sont tout différents et assez compliqués : un courant électrique, mis en jeu par l'oscillation d'un fléau de balance, actionne des dynamos, qui déplacent des contrepoids; lorsque l'équilibre est rétabli, le contact et, par suite, le courant sont interrompus; les déplacements des contrepoids s'inscrivent sur un compteur. L'appareil exposé a été construit par MM. William et Thomas Avery, de Londres et Birmingham. C'est un premier spécimen qui aurait besoin d'être simplifié pour devenir pratique.

SECTION II.

DYNAMOMÈTRES, COMPTEURS, ENREGISTREURS.

SOMMAIRE.

Généralités. — Division.

Mesure de la force. — Dynamomètres statiques. — Machines à essayer les matériaux. — Machines de Trayvou, de Delaloë, d'Amsler.

Mesure de la vitesse. — Compteurs chronométriques. — Compteurs de tours. — Enregistreurs. — Tachymètres. — Compteurs de Deschiens, de Château, de Monseran, de Sainte, de Texier de la Pommeraye, de Bisson, de Lamotte, de Portafax. — Tachymètres de Buss, de Richard, de Duveau.

Mesure du travail. — Frein de Prony. — Dynamomètres. — Frein Raffard. — Dynamomètres de rotation de Creil, de Vuaillet, de Leneveu, d'Eug. Bourdon, de Richard, de Raffard, de Panhard et Levassor. — Indicateur de Watt. — Le cheval-vapeur. — Congrès de Paris. — Le poncelet. — Indicateurs de Crosby, de Garnier, de Martin, de Lefebvre.

De même que la physique, de même que la chimie, de même que toutes les sciences appliquées, la mécanique n'a fait des progrès sûrs et rapides qu'à partir du moment où les quantités qu'elle traite ont pu être mesurées avec facilité et exactitude.

Les quantités fondamentales que traite le mécanicien sont les suivantes : les forces, les longueurs et les temps. En combinant entre elles ces quantités fondamentales de différentes façons, on obtient des quantités dérivées en nombre considérable. Il serait inutile de les énumérer; établissons seulement la liste des quantités qui font l'objet ordinaire des mesurages, ce sont :

1° La *force.* Les instruments servant à mesurer la force s'appellent des *dynamomètres.*

2° La *vitesse,* résultant de la combinaison d'une longueur avec un temps. Les instruments destinés à mesurer la vitesse s'appellent, suivant leurs dispositions et l'objet spécial auquel ils sont affectés, des *tachymètres,* des *compteurs,* des *enregistreurs,* etc.

3° La *pression par unité de surface,* combinaison d'une force avec le produit de deux longueurs. Les instruments employés pour mesurer la pression unitaire exercée par un fluide sont les *manomètres;* nous les avons déjà étudiés et nous n'y reviendrons pas.

4° Le *travail* et le *moment.* Ces deux quantités résultent, l'une et l'autre, de la combinaison d'une force et d'une longueur; le travail peut aussi résulter de la combinaison d'un moment avec un déplacement angulaire. Les instruments destinés à mesurer soit le travail, soit le moment, ont reçu le nom, assez fâcheusement imaginé, de *dynamomètres;* la même dénomination est également, comme on l'a vu, appliquée aux appareils qui servent à mesurer la force; de là des confusions regrettables. Le travail peut encore s'exprimer sous bien des formes différentes; l'une des plus usitées, lorsqu'il

s'agit de machines actionnées par des fluides, est la combinaison d'un volume (produit de trois longueurs) avec une pression par unité de surface; c'est cette définition qui sert de point de départ au remarquable outil connu sous le nom d'*indicateur de Watt.*

5° Enfin le travail exécuté par un moteur pendant l'unité de temps constitue la *puissance* de ce moteur, quantité composée des trois unités fondamentales, la force, la longueur et le temps; plus encore que le travail, la puissance peut se mettre sous des expressions variées, représentant des combinaisons diverses des grandeurs fondamentales : le travail avec le temps; la force avec la vitesse; un moment avec une vitesse de rotation; un volume, un temps et une pression par unité de surface, etc. Il existe peu d'instruments propres à donner directement la mesure de la puissance; généralement on se contente de mesurer le travail pendant un temps donné, qu'on détermine à l'aide d'une horloge; cette mesure ainsi relevée exige donc deux observations simultanées; quelquefois aussi on mesure à la fois le moment et la vitesse de rotation.

Nous suivrons, à peu de chose près, dans ces études, l'ordre qui vient d'être indiqué.

Commençons par la mesure de la force. Nous laisserons de côté la mesure des poids, qui a été traitée dans la section précédente.

La mesure d'une force a pour objet de comparer cette force à l'unité de force, au kilogramme. Divers procédés sont employés pour effectuer cette comparaison. Le plus simple consiste à faire équilibre à la force à mesurer, à l'aide de leviers et de transmissions mécaniques, par des poids. Le rapport des chemins virtuels parcourus par le point d'application de la force et par les poids résulte des conditions de la transmission et permet de calculer immédiatement l'effort. C'est le principe de la balance et de la bascule.

Ce procédé est exact et certain; on est toujours obligé d'y revenir lorsqu'on a à vérifier n'importe quel instrument de mesure. Il a l'inconvénient d'exiger des appareils volumineux et encombrants, lorsque les forces à mesurer sont un peu grandes. Il ne s'applique d'ailleurs qu'à l'état statique, sur des organes au repos, ce qui en limite fréquemment l'emploi.

On se sert souvent de ressorts : un ressort bien construit prend, dans certaines limites, des flèches proportionnelles aux charges qu'il supporte; le vulgaire instrument appelé *peson* n'est autre chose qu'un ressort. Mais grâce aux recherches des Morin, des Phillips et autres savants, les règles à observer dans la construction des ressorts ont été définitivement établies; Morin, en particulier, a fait de ces sortes d'organes des applications étendues et du plus haut intérêt à la mesure des forces; entre ses mains, le dynamomètre à ressort est devenu un outil exact et d'un usage commode.

Certains constructeurs se servent d'un autre procédé qui, lorsqu'il est bien appliqué, peut fournir des résultats corrects : la force à mesurer s'exerce sur un piston de presse hydraulique, et un manomètre donne la pression qui en résulte; cette pression est proportionnelle à l'intensité de la force; des dispositifs convenables permettent soit

d'annuler les frottements, soit d'apporter les corrections voulues pour tenir compte de leur influence; les déplacements du piston sont extrêmement faibles, avantage précieux dans bien des cas.

Qu'il s'agisse de dynamomètres à ressort ou à pression hydraulique, il faut en graduer les échelles et vérifier de temps à autre cette graduation. Le seul moyen véritablement exact de le faire, c'est de tarer le dynamomètre, c'est-à-dire de le charger de poids connus; on se trouve ainsi ramené indirectement au premier des dispositifs que nous avons étudiés, celui dans lequel la force antagoniste opposée à la force inconnue à mesurer est fournie par des poids.

Dans ces dernières années, le dynamomètre statique a principalement été appliqué à l'étude des propriétés mécaniques des matériaux. Jusqu'alors ces propriétés n'étaient connues que d'une manière vague et indécise. Le contrôle de ces propriétés à l'aide de mesures exactes a été le signal d'un progrès énorme et décisif. La question est en effet de première importance : elle intéresse le constructeur, qui sait désormais sur quoi il peut compter, et établit ses dispositions en conséquence; elle intéresse, à un degré au moins égal, le fabricant de matériaux, qui peut suivre pas à pas la marche de sa production, et se trouve ainsi guidé sur la direction qu'il doit lui imprimer.

Pour ne parler que de la métallurgie, on peut dire, sans témérité, que l'emploi usuel des machines d'essai a joué un rôle prépondérant dans l'évolution radicale et profonde que subit de nos jours cette grande industrie.

Ce n'est pas à dire, à beaucoup près, que la technique de ces sortes d'essais soit d'ores et déjà définitivement fixée; on est loin d'être sorti de la période des tâtonnements; et, ce qui le prouve, c'est la diversité des méthodes d'expérience usitées chez les différents métallurgistes.

Ce sont les essais à la traction qui sont les plus répandus. Une éprouvette est prélevée sur la pièce dont on veut contrôler les qualités; cette éprouvette, convenablement taillée, est prise par ses extrémités entre des mordaches; l'une des paires de mordaches est soumise à l'action d'une force variable, mesurée à chaque instant par le dynamomètre; on suit les déformations que subit l'éprouvette; souvent l'épreuve est poussée jusqu'à la rupture; les observations ainsi recueillies fournissent les renseignements les plus précieux. Malheureusement le désaccord existe sur les points les plus essentiels, sur les dimensions de l'éprouvette, sur les points de la pièce où elle doit être prélevée, sur le traitement préalable qu'elle doit subir, trempe, recuit, etc., sur la rapidité de l'opération, sur la nature même des observations à recueillir, etc. Si, dans une usine où l'on procède toujours de la même façon, les résultats obtenus sont comparables entre eux et donnent lieu à des rapprochements pleins d'enseignements, il n'en est plus de même lorsqu'on passe d'une usine à l'autre, où l'on opère de façon différente. Ces discordances sont éminemment regrettables et constituent une lourde entrave à la marche du progrès.

Nous nous en tiendrons aux méthodes ordinaires, telles qu'elles sont pratiquées aujourd'hui par les métallurgistes et définies dans beaucoup de cahiers des charges. Les deux données que l'on réclame le plus souvent sont : la résistance à la rupture et l'allongement après rupture. Toutes les machines d'essai sont en état de fournir correctement la résistance à la rupture; l'allongement se mesure directement sur l'échantillon rompu.

Ces données constituent par elles-mêmes des renseignements d'une grande valeur sur les qualités du métal soumis à l'épreuve. Il serait utile de les compléter par d'autres relevés. On demande souvent à la machine d'essai de permettre d'effectuer des mesures, non seulement à l'instant de la rupture, mais aussi pendant toute la durée de l'épreuve, sous l'action des charges variables auxquelles l'éprouvette est soumise. La mesure des allongements, notamment, serait très intéressante à recueillir; elle permettrait de définir deux quantités, qui jouent un rôle de premier ordre dans l'art des constructions, savoir : le coefficient d'élasticité et la limite d'élasticité. Malheureusement peu de machines sont capables de fournir ces mesures avec exactitude. La question est en effet difficile; les déformations élastiques sont très petites, et la moindre erreur suffit pour en altérer considérablement la valeur; quant aux déformations permanentes, elles sont beaucoup plus grandes et peuvent s'observer sans difficulté; mais il y a, entre ces deux ordres de déformations, une telle disproportion, qu'il est malaisé d'obtenir les unes et les autres à l'aide d'un dispositif commun, de les inscrire sur un même diagramme.

La courbe des allongements en fonction des efforts de traction s'obtient par deux procédés. Le plus simple consiste à soumettre successivement l'éprouvette à des charges croissantes et à mesurer chaque fois la longueur; il convient bien pour les allongements élastiques. Mais lorsque la charge doit être poussée jusqu'à la rupture, ce procédé offre un inconvénient : pour beaucoup de métaux, l'éprouvette, avant de se rompre, subit une réduction progressive de section, qui réduit sa résistance totale, de sorte que l'effort exercé passe par un maximum, puis diminue jusqu'à la rupture. Les machines d'essai ordinaires se prêtent mal à l'étude de ces phénomènes; les machines dites *à indications continues* sont mieux appropriées à ce genre de recherches; elles donnent directement et à chaque instant l'effort de traction auquel est soumis l'éprouvette, sans que l'expérimentateur ait à intervenir autrement que par une simple lecture.

La plupart des machines à essayer par traction comportent quelques pièces accessoires, qui permettent de faire également des épreuves à la compression, à la flexion et même, dans quelques cas, à la torsion. Pour les essais au choc, très utiles à pratiquer sur certains métaux, on fait usage de machines spéciales.

La maison B. Trayvou, de la Mulatière, près Lyon (Rhône), présentait une série intéressante de machines à essayer les métaux. Ces machines sont horizontales ou verticales et marchent à la main ou au moteur. L'éprouvette est soumise, par une de ses

extrémités, à l'effort d'une robuste vis, tandis que l'autre extrémité agit sur une romaine donnant lecture de l'effort exercé; le contrepoids de la romaine est déplacé à l'aide d'une vis mue par l'expérimentateur, de manière à éviter les chocs qui se produiraient par la manœuvre du contrepoids à la main; un dispositif simple permet de vérifier l'exactitude de la graduation. La machine est complétée par les organes nécessaires pour les essais à la compression et à la flexion. Deux spécimens sont présentés, l'un horizontal de 50 tonnes, l'autre vertical de 25 tonnes.

La machine à essayer les fils métalliques est intéressante, en ce qu'elle fournit des indications continues par application du système Dujour, dont nous avons déjà parlé. Elle est représentée par la figure 270 ci-après.

Le fil à essayer est saisi à ses extrémités par des mordaches *A* et *B*. Sur la mordache *A* agit la vis *C*, manœuvrée, à l'aide d'engrenages, par le volant à manivelle *D*; la mordache *B* transmet son effort à une série de leviers de romaine, qui aboutissent à la tige de connexion *EE*, laquelle tire sur un ruban d'acier enroulé sur le secteur *FF*; celui-ci pivote autour de l'axe *G* et est solidaire de la came *GH*; sur cette came s'enroule un ruban d'acier supportant le contrepoids *J*, guidé, avec très large jeu, par la glissière *KK*; à chaque valeur de l'effort de traction exercé par le fil de fer, correspond une position déterminée du système *HGF*; ces déplacements sont renvoyés par engrenage à l'aiguille *LM*, dont les indications sont lues sur une graduation en spirale. Les différentes pièces de la romaine sont soutenues et équilibrées de manière à conserver une liberté complète. Pour éviter le choc au moment de la rupture, on suit, avec la vis *N*, les abaissements du levier *O*, de manière à rendre très minime la hauteur de chute. La puissance de l'appareil est de 5,000 kilogrammes.

Toutes ces machines sont remarquablement conçues et exécutées, d'un maniement commode et sûr.

La machine exposée par M. Léon Delaloë, de Paris, est d'une puissance de 25 tonnes; la traction est obtenue par une presse hydraulique, et la mesure de l'effort de traction est donnée par une romaine. L'appareil est, en outre, pourvu d'un enregistreur : la pression du liquide dans la presse est transmise à un petit piston, contrebutté par un ressort Belleville; les déplacements de ce piston s'enregistrent, comme dans l'indicateur de Watt, sur une planchette dont les mouvements sont proportionnels à l'allongement de l'éprouvette. Cette machine comporte des dispositions ingénieuses et originales.

M. Amsler-Laffon, de Schaffhouse, l'éminent auteur du planimètre polaire, de concert avec son fils, expose un remarquable appareil destiné à l'épreuve des ciments, et qui lui avait été demandé par M. le professeur Tetmajer, de Zurich, bien connu pour ses beaux travaux sur la matière. Nous donnons ci-après (fig. 271) un dessin de cet appareil.

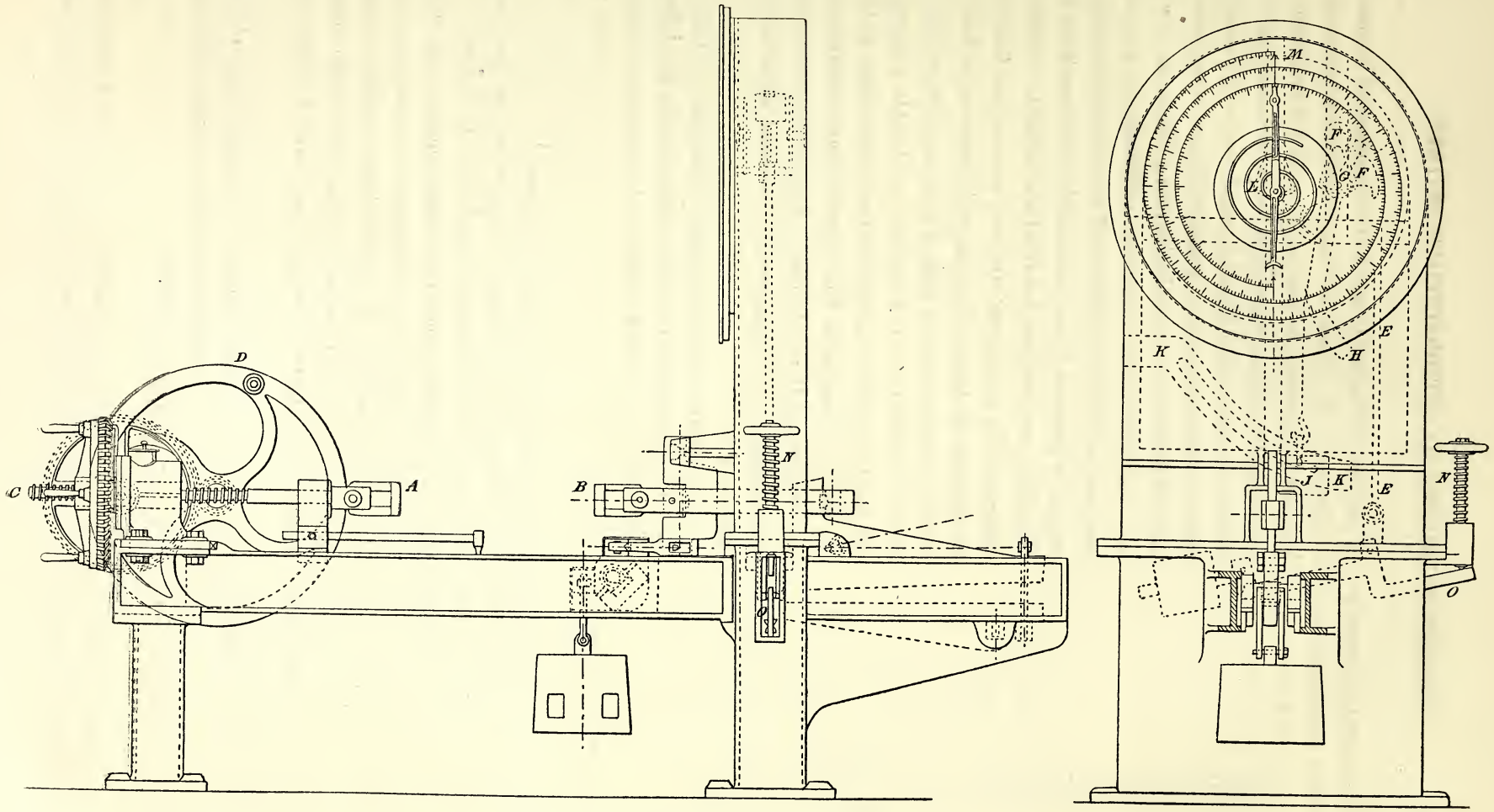


Fig. 270. — Machine à essayer les fils de fer, de Trayvou.

L'éprouvette prismatique en mortier de ciment *A*, qui doit être soumise à la compression, est saisie entre deux plaques *B*, *C*, jouant sur des rotules sphériques, qui assurent le centrage; la mise en pression est commencée par la vis *D*; elle est augmentée progressivement par un piston de presse hydraulique; le bas du corps de presse *F* porte un deuxième piston, premier élément d'un manomètre différentiel, dont les indications se lisent sur la colonne mercurielle *GG*; la pression est donnée par un petit compresseur *H*, branché directement sur le corps de presse et dont le plongeur à vis est commandé par la manivelle *K*. Il fallait, pour obtenir des résultats corrects, annihiler l'influence des frottements. On y est parvenu par l'artifice imaginé par M. Amagat dans ses expériences sur les fluides à très haute pression; il suffit d'avoir des pistons ajustés avec un faible jeu, et d'employer un liquide visqueux, tel que la glycérine; un petit levier *L*, passé dans la tête du piston, permet de le faire tourner pour constater qu'il est entièrement libre. D'ailleurs, l'appareil peut être taré directement à l'aide d'une romaine prenant appui sur les plaques *B* et *C*.

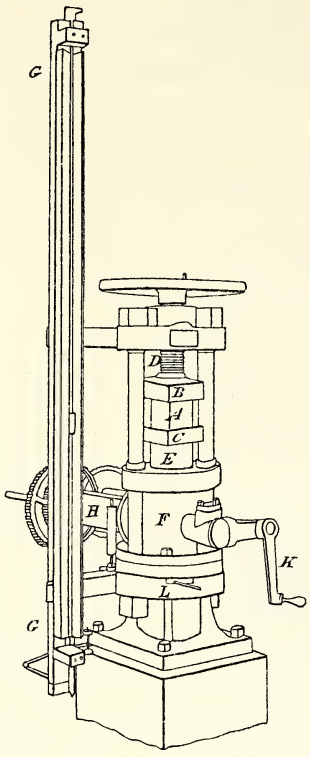


Fig. 271.
Machine pour l'essai des ciments, par M. Amsler-Laffon.

Cette petite machine est simple et élégante; elle tient peu de place et peut s'installer n'importe où; les chiffres qu'elle fournit sont très corrects; la manœuvre est simple et facile.

Arrivons aux instruments ayant pour objet la mesure de la vitesse.

La vitesse est l'espace parcouru dans l'unité de temps; si l'espace est une longueur, la vitesse est dite *linéaire;* si c'est un angle, la vitesse est *angulaire* ou de *rotation.*

En matière de chemins de fer, c'est ordinairement des vitesses linéaires des trains que l'on a à se préoccuper; mais, dans les applications ordinaires de la mécanique, on a affaire le plus souvent à des arbres tournants, et c'est la vitesse angulaire de ces arbres que l'on a généralement à mesurer. L'expression la plus usitée d'une vitesse angulaire est le nombre de tours faits par l'arbre tournant dans l'unité de temps, seconde, minute ou heure.

Parmi les procédés employés pour mesurer les vitesses, le plus simple et le plus en usage consiste à mesurer séparément et par des instruments spéciaux les deux éléments dont se compose la vitesse, à savoir : le temps et l'espace.

Le temps se mesure au moyen de montres et d'horloges; mais, pour l'application spéciale que nous avons en vue, ces horloges affectent fréquemment des dispositions

particulières, destinées à en rendre l'usage plus commode; elles prennent alors le nom de *compteurs chronométriques.*

Il y en a de deux espèces : dans certains compteurs, le départ et l'arrêt sont commandés par un bouton; les aiguilles étant ramenées au zéro et le mouvement arrêté, au moment où commence le phénomène à mesurer, l'observateur pousse le bouton, et le compteur se met en route; une seconde poussée, pratiquée à la fin de l'opération, produit l'arrêt des aiguilles; dès lors une simple lecture suffit pour donner la valeur du temps qui s'est écoulé entre les deux poussées.

Dans les compteurs dits *à pointage,* la marche est continue; l'aiguille principale, celle des secondes d'ordinaire, entraîne avec elle une pointe fine imbibée d'encre; à chaque observation à relever, l'observateur, en poussant un bouton, fait marquer par la pointe un point sur le cadran. La lecture de l'intervalle existant entre deux de ces points donne la durée du temps qui s'est écoulé entre les instants où ils ont été tracés.

Quelquefois les deux dispositifs sont combinés dans un même compteur chronométrique.

Quel que soit le genre de compteur chronométrique dont on fait usage, il importe de vérifier s'il est bien réglé et si les indications qu'il fournit sont correctes. C'est là un point capital dont beaucoup d'observateurs ont le tort de ne pas assez se préoccuper; d'ailleurs, il faut bien le dire, la plupart des compteurs se prêtent mal à ces sortes de vérifications.

Les compteurs chronométriques ressortissent principalement à l'horlogerie; ce n'est donc pas ici le lieu de les étudier en détail.

La mesure d'un espace revient pratiquement au comptage du nombre de fois qu'un même effet se reproduit, nombre de fois qu'un mètre peut être reporté sur une longueur, nombre de tours que fait un arbre, etc. Ce comptage peut se faire à la vue, à l'ouïe ou au toucher; mais cette méthode de compter, fort simple et naturelle, expose à de graves erreurs, lorsqu'on a affaire à des mouvements un peu rapides ou prolongés. Il faut alors recourir à des compteurs mécaniques. Les montres et horloges ne sont autre chose que des compteurs mécaniques, qui donnent le comptage du nombre d'oscillations qu'a exécutées le pendule ou le balancier.

Les compteurs ordinaires reposent sur le même principe. Chaque fois que se reproduit le phénomène à compter, une roue dentée avance d'un cran, et ce mouvement se transmet, par engrenages, à un système indicateur. Ce système est lui-même constitué de deux façons : ou bien ce sont des aiguilles se mouvant sur un cadran divisé, ou bien ce sont des disques mobiles, portant à leur circonférence des chiffres qui viennent apparaître dans des fenêtres; la lecture se fait ainsi, soit sur une graduation, soit en chiffres.

Il existe un grand nombre de dispositions diverses, adaptées aux différents genres d'observations qui peuvent se présenter. Les compteurs les plus en usage sont les

IMPRIMERIE NATIONALE.

compteurs *alternatifs* qui comptent les oscillations, telles que celles d'un piston ou d'un balancier, et les compteurs *continus*, qui comptent directement le nombre de tours d'un arbre.

La mesure simultanée du temps et de l'espace exige, en général, la collaboration de deux observateurs. Pour éviter cet inconvénient, on dispose quelquefois les choses de telle sorte qu'un seul déclic fasse partir, puis arrêter à la fois, le compteur d'unités et le compteur chronométrique.

Dans tous les cas, la vitesse obtenue en divisant l'espace par le temps est la *vitesse moyenne* pendant la durée de l'observation; cette durée ne peut guère être moindre qu'une minute ou une demi-minute; et, dans bien des cas, dans cet intervalle, la vitesse a pu s'écarter de cette moyenne dans des proportions notables, et qu'il peut être nécessaire de connaître. On a alors recours à des appareils à indications continues.

Les appareils dits *enregistreurs* sont de ce nombre : une feuille de papier se déroule avec une vitesse uniforme, sous l'action d'une horloge; perpendiculairement à la direction de cette vitesse, un crayon, relié par une transmission au point dont on veut étudier le mouvement, se meut proportionnellement aux déplacements de ce point; le crayon trace ainsi sur le papier une ligne ayant, à une échelle déterminée, les temps pour abscisses et les déplacements pour ordonnées; cette figure, ou *diagramme*, permet de retrouver toutes les circonstances du mouvement. Les diagrammes d'enregistreur possèdent cette précieuse propriété, de conserver indéfiniment la trace des phénomènes fugitifs du mouvement; non seulement ils donnent la possibilité d'étudier à loisir, de comparer les allures, etc., mais ils fournissent un document permanent et incontestable, qui, dans beaucoup de cas, présente une haute valeur. Le système de l'enregistrement est fort apprécié et s'est beaucoup répandu; nous en avons vu des applications nombreuses et nous en retrouverons d'autres encore.

Un autre moyen de connaître la vitesse instantanée d'un organe de machine consiste à la relier à un système déformable et dont les déformations varient avec la vitesse; le régulateur à force centrifuge est un exemple de ce genre d'appareils. Les indicateurs de vitesse ainsi constitués prennent le nom de *tachymètres*. Leurs indications se traduisent d'ordinaire par les mouvements d'une aiguille sur un cadran; elles sont également susceptibles d'enregistrement. Les tachymètres sont fort employés dans les stations centrales d'électricité, où il importe au plus haut degré de maintenir aussi constante que possible l'allure des dynamos génératrices du courant.

M. Eug. Deschiens, de Paris, s'est fait une spécialité de la construction des compteurs et a imaginé un grand nombre de dispositifs nouveaux, s'adaptant aux divers genres d'observations que l'on peut avoir à relever. Il fabrique des compteurs alternatifs et des compteurs continus. La figure 272 représente un modèle de compteur

continu fort commode pour les expériences sur les moteurs à vapeur et autres. L'arbre principal du compteur peut recevoir des abouts de différentes formes, *A*, *B*, *C*, *E*, *F*, ou une manivelle *D*; dans les expériences ordinaires, on se sert souvent de l'about *B*, qui a la forme d'une pyramide triangulaire; cette pyramide s'enfonce dans le trou de

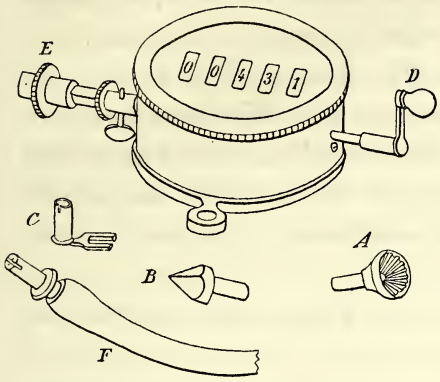


Fig. 272. — Compteur continu E. Deschiens.

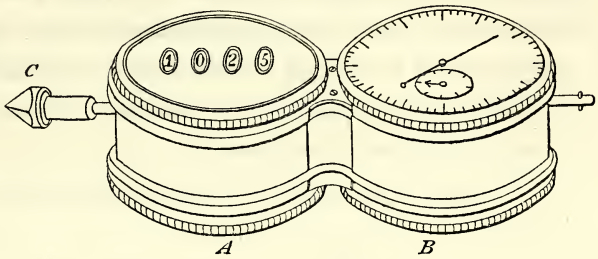


Fig. 273. — Compteur Deschiens.

pointeau que porte presque toujours l'arbre de la machine, lequel est ainsi rendu solidaire de celui du compteur. Pour éviter la nécessité de deux opérateurs, M. Deschiens a établi le modèle représenté fig. 273; *A* est le compteur de tours, mis en liaison avec l'arbre du moteur par son about pyramidal *C*; *B* est un compteur chronométrique à départ; la pression exercée sur l'about suffit pour faire partir ce compteur, de sorte que le compteur chronométrique et le compteur de tours partent et s'arrêtent en même temps; les observations ainsi faites présentent beaucoup de commodité et de sécurité. Les deux compteurs sont pourvus d'une remise à zéro indépendante.

M. Deschiens construit également de grands compteurs pour les usines à gaz et autres industries, des compteurs à distance, avec transmission électrique, etc. Tous ces appareils sont établis avec une grande perfection; ils rendent chaque jour à l'industrie les services les plus signalés.

MM. Chateau père et fils, de Paris, ancienne maison Collin et Wagner, exposent un grand nombre de modèles de compteurs alternatifs ou continus, pour omnibus, contrôleurs de rondes et autres appareils de même nature.

M. Mouseran, de Paris, applique le principe des compteurs au métrage des bobines; le fil, soumis à une tension constante, s'enroule sur la jante d'une petite poulie, de diamètre déterminé, et le compteur indique le nombre de tours.

Citons encore, parmi les bons fabricants, MM. Sainte, March et Cie, M. Texier de la Pommeraye (distributeurs de tickets), M. Bisson (compteurs d'omnibus et distributeurs de bonbons); ces trois maisons sont de Paris.

Plusieurs inventeurs présentent des compteurs plus ou moins bien combinés, pour contrôler la marche des voitures de place; mentionnons, entre autres, M. Lamotte, de Niort, et M. Portafax, de Paris.

Arrivons aux *tachymètres,* appareils ayant pour objet, comme on l'a vu, de donner directement, à chaque instant et par une simple lecture, la mesure de la vitesse.

L'un des plus employés est celui construit par MM. Buss et Cie, de Paris. Il est fondé sur le principe de la force centrifuge : un axe, mis en relation avec l'arbre en mouvement, porte par des articulations deux masses excentrées, qu'un ressort tend constamment à ramener vers le centre; il s'établit, pour chaque vitesse, une position d'équilibre; les déplacements centrifuges des masses sont renvoyés, par une transmission, à une aiguille indicatrice.

La figure 274 représente le tachymètre Buss. *AA* est l'axe principal, portant une

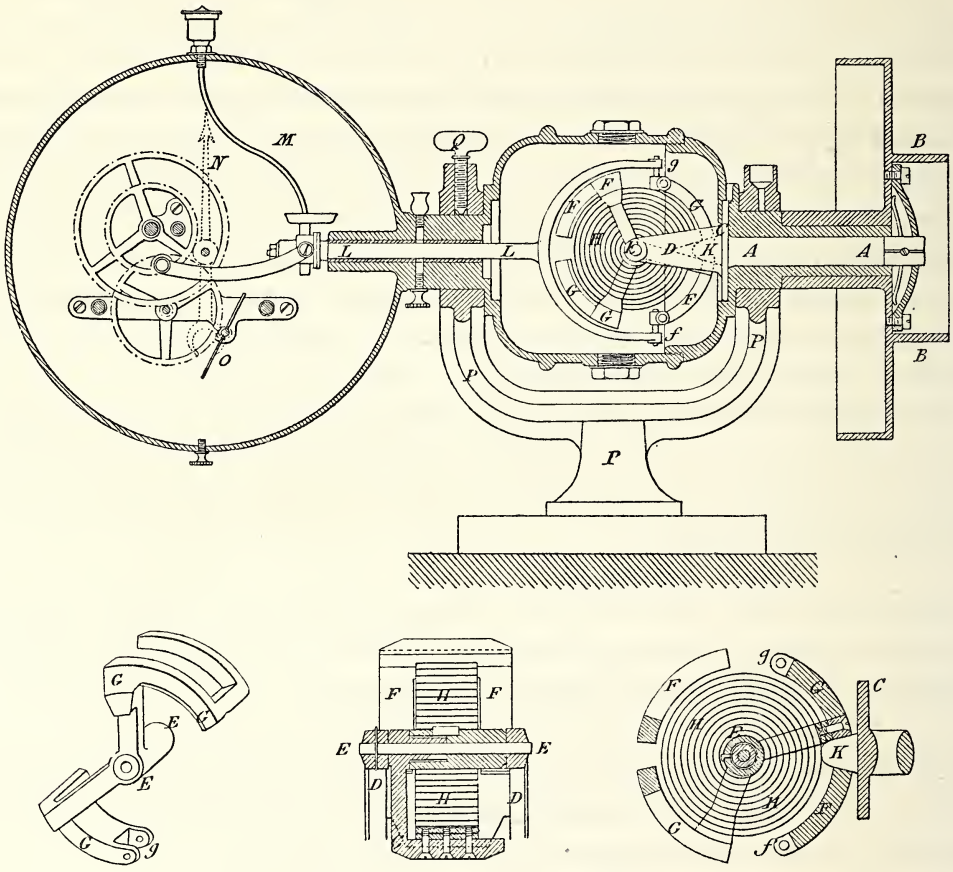


Fig. 274. — Tachymètre de Buss.

poulie *B*, qui reçoit la courroie jetée sur une poulie montée sur l'arbre à expérimenter; le plateau *C*, solidaire de *A*, porte, par les deux potences *DD*, l'axe transversal *EE*,

sur lequel pivotent les deux masses *EFFF* et *EGGG*. Ces masses sont assemblées, l'une au centre, l'autre à la périphérie d'un grand ressort spiral *HH*, qui tend constamment à les ramener au contact de l'appui commun *K*. Lorsque, par l'effet de la rotation imprimée au système, la force centrifuge devient suffisante pour surmonter la résistance opposée par le spiral, les masses s'écartent, et leur écart augmente en même temps que la vitesse. En *f* et *g*, ces masses s'articulent sur une fourchette, qui transmet, par l'axe *LL*, les déplacements à l'appareil indicateur *M*; celui-ci se compose d'un train d'engrenage, et communique, en les amplifiant, les déplacements à l'aiguille *N*, qui les indique sur un cadran; un papillon *O*, mû par le même train, s'oppose aux effets de vibration et de lancé. Les masses mobiles sont tracées de telle sorte que leur centre de gravité commun soit toujours sur l'axe de rotation, ce qui permet d'incliner l'appareil dans toutes directions; pour orienter le cadran dans la direction la plus commode pour la lecture, on le fait tourner dans les douilles de son support à fourche *PP*, et on le tient en place par la vis de serrage *Q*. La course de la tige *L* est faible, 1 ou 2 centimètres, et, par suite, les déplacements sont sensiblement proportionnels aux vitesses, ce qui facilite beaucoup la graduation du cadran. Les tachymètres dont il s'agit se transforment en enregistreurs. Ils sont très ingénieusement conçus, fort bien établis, et rendent de sérieux services à de nombreuses industries.

MM. Richard frères, de Paris, se sont appliqués à la construction d'appareils enregistreurs; ils ont étudié ces appareils dans tous leurs détails, ont apporté dans leurs organes et dispositions des perfectionnements ingénieux et des simplifications impor-

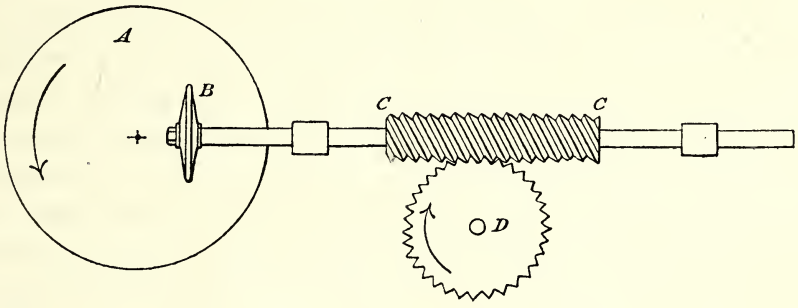


Fig. 275. — Cinémomètre Richard.

tantes; ils ont su les rendre pratiques. Les appareils Richard se trouvent aujourd'hui non seulement dans les laboratoires, mais dans toutes les usines et chez les particuliers. Ils s'appliquent aux mesures les plus variées, température de l'air, des foyers, des fumées, des récipients, pression barométrique, manométrique, tirage des cheminées, mouvement des eaux dans les rivières et réservoirs, etc. Nous ne nous occuperons ici que des appareils destinés à la mesure de la vitesse, et que MM. Richard appellent *cinémomètres* (fig. 275).

Sur un plateau *A*, animé d'une vitesse uniforme de rotation, s'appuie une roulette *B*, dont l'axe est guidé suivant une perpendiculaire à l'axe de rotation du plateau; l'axe de la roulette porte une vis tangente à la roue dentée *D*, qui reçoit son mouvement de la machine à expérimenter. Si *D* est immobile, la roulette, en tournant, visse son axe sur la jante de *D* et se rapproche du centre de *A*, où elle s'arrête; si *D* tourne dans le sens de la flèche, la roulette s'éloignera du centre; par suite, sa vitesse de rotation ira en augmentant; la roulette se vissera donc de plus en plus vite, ce qui tendra à la rapprocher du centre; par suite, sous l'action de ces deux tendances opposées, elle prendra une position d'équilibre, dans laquelle sa distance au centre sera proportionnelle à la vitesse de l'arbre *D*. Les déplacements de l'axe *CC* sont transmis à une aiguille, qui les indique sur un cadran.

Les principaux éléments de ce dispositif, notamment la roulette ainsi que son axe fileté, avaient reçu antérieurement de nombreux et intéressants emplois; mais la combinaison de ces éléments et leur application à la mesure de la vitesse paraissent originales et sont fort ingénieuses.

Des dispositions spéciales assurent le bon fonctionnement de l'appareil. Pour éviter le glissement accidentel de la roulette, elle est pressée entre deux plateaux animés de vitesses égales et opposées; l'un des plateaux tourne dans un coussinet fixe, l'autre est appuyé sur la roulette par un ressort; le mouvement de ces plateaux est pris sur la machine motrice et uniformisé par un régulateur Foucault.

Les mêmes constructeurs utilisent les propriétés de la roulette pour déterminer la vitesse d'une roue ou d'un volant, à distance et sans toucher à la machine. Sur un disque, tournant avec une vitesse uniforme et bien déterminée, s'appuie la jante d'une roulette, qui peut se déplacer radialement, et par conséquent prendre des vitesses variées; sur l'axe de la roulette est monté un second disque percé, sur son pourtour, de fenêtres étroites et équidistantes. A travers ces fenêtres, on regarde, par exemple, les bras d'un volant; si le nombre des bras est le même que celui des fenêtres, et si la vitesse du volant est égale à celle du disque perforé, il se produira un effet bien connu : le volant paraîtra immobile. Si le volant paraît tourner, c'est que sa vitesse sera différente de celle du disque, mais on pourra toujours ramener l'égalité par le déplacement de la roulette suivant son axe. Cette égalité obtenue, un calcul très simple permet de déterminer la vitesse de la roulette et, par suite, celle du volant observé. Nous aurons, par la suite, à étudier d'autres appareils non moins intéressants établis par MM. Richard.

M. A. Duveau, de Paris, a imaginé, pour déterminer les vitesses de rotation, un appareil aussi ingénieux qu'original. L'inventeur mesure la vitesse d'un arbre en la comparant à celle d'un axe tournant d'un mouvement uniforme (fig. 276). Une roulette, folle sur son axe *BH*, lequel pivote autour du point fixe *B*, est pressée entre deux disques *C* et *D*, tournant en sens inverse l'un de l'autre; ces deux disques sont excen-

trés l'un par rapport à l'autre, et leurs axes E, F sont situés à égales distances de part et d'autre de B. Le disque D reçoit, d'un appareil chronométrique, un mouvement uniforme de rotation; le disque C est mis en relation avec l'arbre à expérimenter. Si les vitesses des deux disques sont égales, il est clair que l'axe de la roulette viendra se placer suivant la normale BG à la ligne des centres F, B, E; si la vitesse de C devient prépondérante, la roulette sera entraînée dans le sens de cette vitesse, et s'arrêtera dans une position d'équilibre, telle que BH, dépendant de l'écart entre les vitesses des deux disques; ces écarts sont indiqués sur un cadran gradué, parcouru par l'aiguille C montée sur l'axe de la roulette.

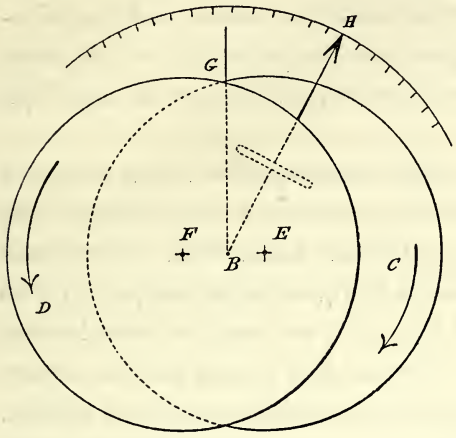


Fig. 276. — Tachymètre Duveau.

Le mouvement uniforme du disque D est donné par un moteur électrique régularisé par un diapason interrupteur du courant. Les déplacements de l'aiguille H peuvent être facilement transmis à un enregistreur.

Ce tachymètre est fort sensible; il permet de déceler des variations de vitesse très petites, celles, par exemple, qu'éprouve à chaque demi-révolution le volant d'une machine à vapeur à allure rapide.

Nous arrivons à la mesure du travail. Lorsqu'il s'agit de mesurer le travail développé par une machine motrice, le procédé simple et classique consiste à se servir du frein de Prony. Monté sur un arbre tournant, le frein de Prony absorbe, par frottement, la totalité du travail communiqué à l'arbre; il permet de mesurer le moment moteur par une pesée, de la même manière qu'une balance donne le poids des corps déposés dans un de ses plateaux. Le produit du moment par le nombre de tours exécutés dans un temps donné fournit, à un facteur constant près, la valeur du travail transmis pendant le même temps.

Mais le frein de Prony, absorbant la totalité du travail moteur, n'est applicable que dans les cas où ce travail n'a pas besoin d'être utilisé. Lorsque l'on veut mesurer le débit d'une conduite d'eau, le procédé le plus exact consiste à recevoir dans une bâche l'eau débitée et à la peser; mais alors l'eau a perdu sa pression; la bâche pesée n'est pas un compteur d'eau. De même le frein de Prony, à ce point de vue, ne peut être considéré comme un compteur de travail.

La solution complète du problème supposerait un appareil intercalé sur le parcours de la transmission, traversé par le courant d'énergie et donnant à chaque instant la valeur de ce courant; ce serait là le véritable compteur de travail. Les conducteurs

d'électricité se prêtent, dans certaines limites, à des mesures de cette espèce, par les phénomènes particuliers dont l'espace qui les environne est le siège, phénomènes que l'on peut mesurer, sans modifier sensiblement les éléments du courant qui traverse le conducteur. Cette remarque a donné lieu, dans ces dernières années, à des applications du plus grand intérêt; néanmoins, on ne peut pas dire que l'électricité ait fourni jusqu'ici aux mécaniciens des procédés simples et certains pour mesurer le travail qui est fourni par une transmission.

Cette mesure est fournie par les instruments appelés *dynamomètres :* nous avons fait observer précédemment combien cette dénomination est ambiguë. La mesure du travail a été donnée, pour un cas tout particulier, par l'illustre James Watt. Une méthode beaucoup plus générale a été imaginée par le général Morin, et appliquée par lui dans un grand nombre d'expériences. Le travail étant le produit des deux facteurs, force et chemin parcouru, Morin mesurait la force par la flexion d'un ressort taré; la mesure du chemin parcouru était fournie par une simple transmission mécanique, agissant sur un organe indicateur. Les dynamomètres de Morin étaient, suivant les cas, enregistreurs ou totalisateurs. Dans les dynamomètres enregistreurs, l'organe indicateur était une bande de papier, se déroulant d'un mouvement proportionnel à celui du point d'application de la force; sur cette bande, et perpendiculairement à son mouvement, un crayon traçait une ligne dont les abscisses étaient proportionnelles à la flexion du ressort, c'est-à-dire à la force. L'aire de la surface ainsi déterminée donnait le travail transmis. Dans les dynamomètres totalisateurs, un disque, tournant d'un mouvement proportionnel au déplacement, recevait le contact d'une roulette, dont la distance au centre de rotation du disque était proportionnelle à la flexion du ressort; l'angle de rotation de la roulette donnait la mesure du travail transmis, et cette mesure était recueillie par un compteur de tours.

Chacun de ces deux procédés présente des avantages : l'enregistreur fournit et conserve la trace fidèle de tous les faits qui se sont passés dans l'instrument; mais, par son détail même, il nécessite un dépouillement long et laborieux. Ce dépouillement se trouve tout fait dans le totalisateur, qui n'exige que deux lectures, l'une au commencement, l'autre à la fin de l'expérience, mais le détail des phénomènes disparaît.

Morin construisit des dynamomètres applicables aux deux cas les plus usuels : déplacement rectiligne du point d'application de la force, et rotation de ce point autour d'un axe.

L'indicateur de Watt et le frein de Prony ont été tout de suite employés par les mécaniciens qui en ont fait le plus large usage. Au contraire, les dynamomètres ne se sont que lentement répandus dans les ateliers; ceux construits par Morin étaient plutôt des instruments de recherche et de laboratoire, un peu délicats de construction et de maniement. Et cependant, tout le monde en avait le sentiment, il y aurait eu un intérêt de premier ordre, aussi bien commercial que technique, à pouvoir compter le travail comme on compte n'importe quelle marchandise, le charbon, le grain, l'eau, le gaz;

à constater à chaque instant la quantité de travail que développe tel moteur, ou qu'absorbe telle machine-outil sous les allures variables imposées par les exigences des ateliers. Mais on reculait devant les difficultés du problème.

Les grandes administrations techniques, marines d'État, compagnies de navigation, compagnies de chemins de fer, riches, bien outillées, pour lesquelles la mesure exacte de la résistance des véhicules avait une importance capitale, ont été les premières à construire de puissants dynamomètres. L'avénement des industries électriques est venu donner une nouvelle impulsion. Néanmoins on ne saurait dire que la question soit pratiquement résolue : les compteurs de travail n'ont pas encore reçu une forme qui leur permette d'être admis couramment dans l'industrie ; ils sont restés à l'état d'instruments d'expérience. L'étude des dynamomètres exposés n'en est pas pour cela moins intéressante.

En ce qui concerne le frein de Prony, on a apporté dans sa construction des perfectionnements importants, qui en ont rendu les indications plus précises et surtout l'usage beaucoup plus commode. On s'en sert aujourd'hui pour mesurer le travail développé par des moteurs de grande puissance. Pour ces sortes d'applications, on s'était jusqu'alors buté à un obstacle, c'est la chaleur considérable développée par le frottement du sabot de frein sur la jante de la poulie. A la lumière des notions nouvelles sur la mécanique de la chaleur, on a pu analyser le phénomène, et apporter à ces effets fâcheux un remède efficace, à savoir, la circulation d'un courant d'eau froide au contact de la jante échauffée par le frottement.

Lorsqu'on fait usage du frein de Prony sous sa forme habituelle, il faut beaucoup d'attention pour maintenir la pression du sabot exactement au degré voulu ; d'ordinaire un observateur spécial est chargé de cette mission. On a imaginé un grand nombre de dispositifs pour écarter cette difficulté. L'un des plus ingénieux a été proposé par M. V.-J. Raffard, de Paris, bien connu par ses nombreuses inventions en matière de mécanique. M. Raffard a donné à son appareil le nom de *balance dynamométrique*. Il dérive du principe ci-après : soit un lien flexible appliqué en guise de sabot, sur la jante de la poulie qui reçoit la puissance motrice ; ce lien reçoit à ses deux bouts des tensions constantes ; pour une valeur donnée du coefficient de frottement, le moment résistant total variera rapidement avec la longueur de l'arc embrassé ; on peut donc, en réglant convenablement cette longueur, et sans changer la tension du lien, compenser les variations qui se produisent incessamment dans l'état des surfaces frottantes, et cette compensation peut être rendue automatique.

Le principe dont il s'agit avait été appliqué au même objet par divers inventeurs, notamment par M. Jules Carpentier. M. Raffard a créé des agencements fort bien compris ; la figure 277 représente l'un de ces dispositifs. L'arbre à expérimenter porte une poulie fixe A, montée entre deux poulies folles BB'. Sur l'arbre de la poulie fixe s'en-

roule la sangle *abcD*; cette sangle reçoit en *D* l'action du poids *E*; à son autre extrémité *a*, la tension est donnée par le poids *F*, plus fort que *E*, et qui transmet son action par l'intermédiaire du fléau *GHJ*, oscillant autour du point fixe *H*, des deux sangles

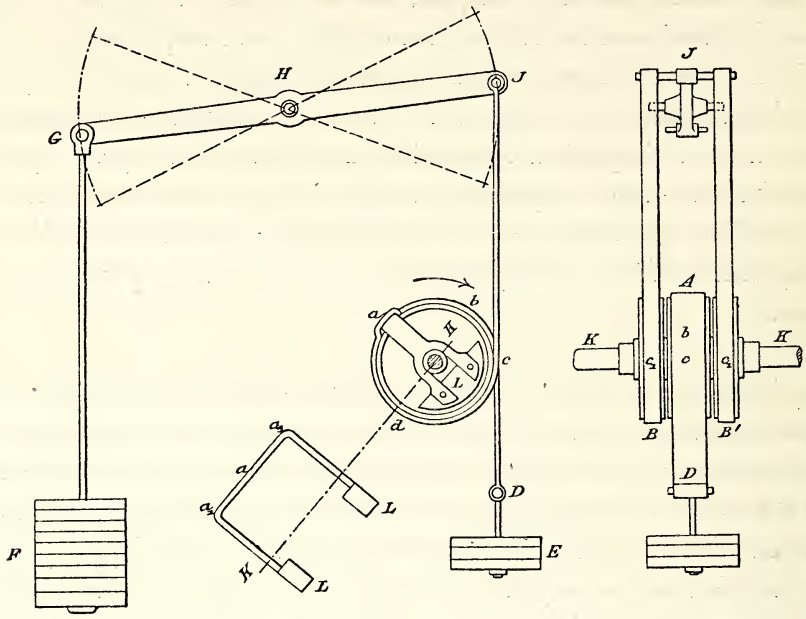


Fig. 277. — Balance dynamométrique de Raffard.

latérales *JB* et *JB'*, lesquelles s'enroulent sur les poulies folles *BB'* suivant l'arc *cda*, et enfin du joug a_1aa_1 recevant en a_1a_1 les sangles latérales et en *a* la sangle centrale *A*; ce joug est équilibré autour de l'axe *KK* du système par les contrepoids *LL*. La différence entre les tensions inégales dues aux poids *F* et *E* fait équilibre au frottement développé suivant l'arc *abc* entre la sangle *AD* et la jante de la poulie; elle est donc constante et indépendante du coefficient de frottement; c'est l'arc *abc* qui varie de longueur, en faisant basculer à la demande le fléau *GHJ*. Les sangles se font en tissu de chanvre, de lin ou de fil de fer. Des dispositifs simples assurent la lubrification. L'axe *KK* est relié au moteur à expérimenter par accouplement direct ou par une transmission quelconque. Ainsi constitué, l'appareil peut fonctionner fort longtemps sans qu'on ait à y retoucher, et ses indications sont sûres et exactes. Il fournit immédiatement la vitesse que prend un moteur donné soumis à un couple résistant déterminé.

M. Raffard a modifié de diverses manières les formes de son appareil, pour en adapter le principe aux circonstances qui peuvent se présenter.

En ce qui concerne les dynamomètres, c'est surtout des dynamomètres de rotation qu'on s'est préoccupé; ce sont les seuls qui fussent représentés à l'Exposition. La mesure de l'angle décrit se fait par les moyens ordinaires. La mesure de l'effort a donné lieu à de nombreux essais dans des directions variées : Morin employait des ressorts, comme on l'a vu, et ce procédé est assez généralement employé; c'est celui dont

les compagnies de chemins de fer font usage dans leurs wagons dynamométriques. G. A. Hirn se servait de la déformation élastique des organes mécaniques parcourus par le courant d'énergie, angle de torsion pour les arbres tournants, flèche de balanciers de machines à vapeur, etc.; ces déformations, amplifiées par des leviers multiplicateurs, étaient enregistrées ou totalisées. Hirn a créé, sur ce principe, toute une classe de dynamomètres, qu'il a désignés du nom de *pandynamomètres*.

A l'exemple de White, plusieurs ingénieurs se sont servis de poids agissant par l'intermédiaire de leviers, d'engrenages ou de trains funiculaires. Pour un pareil usage, les poids offrent cet avantage, de donner immédiatement et sans tarage la mesure demandée; par contre, les corps pesants ont une masse, et ces masses introduisent, dans les mesures relevées, des perturbations dues à leur inertie, et dont il est nécessaire de tenir compte pour peu que les mouvements soient rapides. Un des exemples les plus grandioses de ce genre de dynamomètres à poids est l'appareil installé par MM. Gotendorf et Cie sur les projets de M. Napoli, lors des célèbres expériences de transport électrique de l'énergie, exécutées en 1885 par M. Marcel Deprez, entre Creil et Paris. Le dynamomètre établi à Creil recevait une puissance de 100 à 150 chevaux, fournie par une machine fixe, et la transmettait à la grande dynamo génératrice; l'effort transmis était mesuré par une sorte de romaine à bras variable, assez analogue, comme principe, aux bascules automatiques de M. Dujour, avec amortisseur hydraulique atténuant les chocs et effets de lancé.

Pour mesurer les efforts, on se sert quelquefois de pistons hydrauliques, interposés sur le parcours de la transmission; la pression du liquide, donnée par un manomètre, fournit la mesure de la force transmise.

M. Francis Vuaillet, de Saint-Maurice (Seine), expose un petit dynamomètre de rotation fort ingénieusement combiné : l'arbre moteur et l'arbre récepteur, placés dans le prolongement l'un de l'autre, portent des roues dentées égales, lesquelles engrènent avec une paire de roues satellites, solidaires d'un arbre oscillant autour de l'axe commun. Le mouvement ne peut être transmis d'un arbre à l'autre que si une résistance suffisante est opposée au déplacement de l'arbre des satellites; le moment de cette résistance est proportionnel au moment moteur; la mesure en est donnée par la flexion d'un ressort. L'appareil est à volonté enregistreur ou totalisateur.

M. Leneveu, capitaine d'artillerie, a étudié un dynamomètre de rotation, qui figure dans l'exposition de M. Édouard Bourdon, de Paris. Les mesures sont fournies par les déformations d'un ressort à boudin. M. Bourdon expose aussi deux dynamomètres du système créé par son père, Eugène Bourdon, l'éminent inventeur du manomètre métallique; les efforts sont transmis par deux roues d'engrenage à denture hélicoïdale; la poussée longitudinale est proportionnelle à l'effort transmis; elle est équilibrée par un ressort, dont les flèches sont amplifiées par une aiguille indicatrice.

Dans le dynamomètre exposé, sous forme de dessin, par MM. Richard frères, de Paris, l'appareil reproduit, dans son ensemble, les dispositions du dynamomètre de White; mais ici le contrepoids est remplacé par un sommier rempli de liquide dont un manomètre indique la pression. L'appareil est complété par une roulette agissant sur une roue totalisatrice, dont les déplacements angulaires sont proportionnels au travail transmis. On peut encore monter, sur l'axe de cette roue totalisatrice, une vis avec roulette prise entre deux disques tournant uniformément, suivant le dispositif du cinémomètre Richard précédemment décrit; les déplacements de cette deuxième roulette à partir du centre des disques donnent, à chaque instant, la mesure de la puissance.

M. N.-J. Raffard, dont nous avons eu plus d'une fois à mentionner les ingénieuses inventions, s'est préoccupé des glissements qui peuvent se produire dans le fonctionnement des roulettes totalisatrices, fausser ou tout au moins rendre suspects les résultats qu'elles fournissent. Il remarque que ces glissements sont d'autant plus à craindre, que la roulette est plus voisine du centre du plateau sur lequel elle s'appuie. Le totalisateur qu'il propose comporte deux roulettes égales, maintenues à distance constante l'une de l'autre, et voyageant suivant un diamètre commun du plateau, de part et d'autre et assez loin de son centre; la différence des chemins parcourus par les jantes des deux roulettes donne la valeur de l'intégrale cherchée; elle résulte des indications de deux compteurs de tours actionnés par ces roulettes; ces indications offrent, en même temps, un contrôle précieux, car leur somme, s'il n'y a pas eu glissement, est en rapport proportionnel avec le nombre de tours exécutés par le plateau pendant la durée de l'expérience.

La figure 278 représente le dynamomètre construit par MM. Panhard et Levassor, de Paris. La courroie motrice agit sur la poulie A, folle sur son axe; sur le même axe

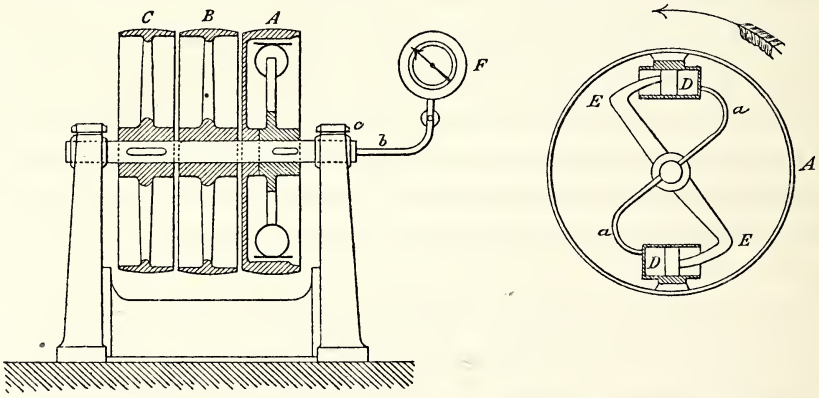


Fig. 278. — Dynamomètre Panhard et Levassor.

sont montées les poulies folle B et fixe C, qui reçoivent la courroie de transmission; le mouvement est communiqué à l'arbre par les deux cylindres DD, solidaires de la poulie A et remplis de liquide; la pression est transmise par les deux pistons hydrau-

liques au croisillon *EE*, calé sur l'arbre commun; la mesure de cette pression est donnée par le manomètre *F* et les communications *aab*, passant par le presse-étoupe *c*. On peut enregistrer le travail en remplaçant le manomètre *F* par un indicateur de pression, qui n'est autre chose qu'un indicateur de Watt, dans lequel le déroulement est contenu et commandé par le mouvement de l'arbre du dynamomètre.

L'indicateur dynamométrique des pressions inventé au siècle dernier par James Watt, était, dans la pensée de son auteur, un instrument d'usage commercial, tel que la balance ou la bascule; il servait au règlement des comptes pour les machines à vapeur qu'il livrait à l'industrie. L'indicateur de Watt fournit un des premiers exemples pratiques de l'enregistrement graphique. Le diagramme d'indicateur est une courbe fermée, élevée sur deux axes coordonnés, sur lesquels sont portés les déplacements du piston de la machine expérimentée et les pressions qui s'exercent sur ce piston; l'aire de ce diagramme représente le travail des pressions pendant une révolution de la machine, à une échelle qui résulte de la construction de l'instrument et des dimensions de la machine; l'expression du travail ainsi déterminé n'est autre que le produit d'un volume par une pression unitaire.

Le diagramme d'indicateur donne un travail, mais non une puissance; pour déduire du travail indiqué la puissance indiquée, il faut faire intervenir la troisième des unités fondamentales de la mécanique, c'est-à-dire le temps; on exprime le temps par la durée d'une révolution ou, sous une force plus concrète, par le nombre de révolutions dans une minute. La mesure du temps exige une observation spéciale et complète, tout à fait indépendante du relevé du diagramme.

Watt avait pris, pour unité de puissance, un chiffre voisin de 75 kilogrammètres par seconde; il l'appela *cheval-vapeur*. Les successeurs de Watt conservèrent la même dénomination; mais, par la suite, et comme conséquence des perfectionnements apportés aux moteurs à vapeur, la valeur de l'unité primitive s'altéra peu à peu, et l'on en arriva progressivement à des chevaux-vapeur représentant tout autre chose que le cheval de Watt; pour calculer l'unité de puissance, les constructeurs faisaient usage de formules tout à fait arbitraires et fantaisistes; la confusion était complète.

Le Congrès de mécanique appliquée, qui s'est tenu à Paris pendant l'Exposition, s'est efforcé de rétablir la clarté et la précision dans ces dénominations. A la suite d'un rapport lumineux de M. Alfred Tresca, le Congrès décida que l'unité de puissance, dénommée *cheval-vapeur,* devait s'entendre comme représentant une valeur de 75 kilogrammètres par seconde. En outre, pour ramener l'évaluation de la puissance au système métrique et décimal, il proposa l'adoption d'une unité nouvelle, de 100 kilogrammètres par seconde, à laquelle il donna le nom de *poncelet,* rendant ainsi un hommage unanime à la mémoire de l'un des créateurs de la mécanique industrielle.

La mesure de la puissance des moteurs donne lieu à quelques observations importantes, dont il n'est pas toujours tenu un compte suffisant dans les contrats.

Tout d'abord la puissance calculée au moyen du diagramme d'indicateur est celle qui résulte des pressions variables qui s'exercent sur le piston; mais ce n'est pas celle que l'on peut recueillir et employer utilement; la différence est la conséquence des pertes de toute nature qui se produisent fatalement dans la transmission entre le piston et le point où le travail doit être utilisé; de là la distinction entre la puissance *indiquée* et la puissance *effective*. Si la première de ces dénominations est tout à fait précise, il n'en est pas de même de la seconde, car l'énergie transmise se dissipe constamment pendant son voyage dans la transmission, de même que, dans une conduite d'eau, la charge va sans cesse en diminuant; suivant donc que les mesures seront prises en un point de la transmission plus ou moins rapproché du moteur, la puissance dite *effective* pourra varier dans des limites étendues. Ordinairement ce terme s'entend de la puissance mesurée sur l'arbre du volant, mais la chose a absolument besoin d'être définie.

En second lieu, la quantité de travail que peut fournir, dans un temps donné, un moteur déterminé dépend, dans les plus larges limites, de l'allure à laquelle il fonctionne. S'il s'agit d'un moteur à vapeur, cette quantité varie avec la vitesse, la pression, le degré de détente, etc. Lorsque la machine est pourvue d'un régulateur, la puissance qu'elle développe se modèle, à chaque tour, sur les résistances qu'elle a à surmonter, de sorte que les mesures que l'on peut relever ne sont autre chose que celles des résistances opposées à la machine. C'est là, d'ailleurs, un des procédés les plus pratiques pour mesurer le travail consommé par les machines-outils.

Il y a, dans cet ordre d'idées, un grand nombre de questions délicates; quelques-unes ont été posées devant le Congrès de mécanique. Mais le Congrès n'a pas cru devoir les résoudre : il a considéré, avec raison, que ces sortes de questions sont de nature commerciale et non technique, que par conséquent elles n'étaient pas de son domaine; que c'est, le cas échéant, aux contractants de rédiger les marchés avec assez de soin et de précision pour ne donner prise à aucune ambiguïté.

Par son enregistrement graphique, l'indicateur de Watt fournit une analyse détaillée des pressions qui se produisent dans un cylindre de machine à vapeur; de là à l'employer comme instrument de recherche et d'étude, il n'y avait qu'un pas, et ce pas a été franchi. Peut-être a-t-on été un peu vite dans cette voie et s'est-on fait parfois quelques illusions sur la rigueur des données relevées à l'aide de cet instrument. Sous sa forme actuelle, il ne paraît pas que l'indicateur présente un degré d'exactitude comparable à celui des instruments ordinaires de laboratoire; il est sujet à des erreurs dues notamment aux frottements, à l'imperfection du tarage et à l'inertie des organes, et il semble bien difficile de s'en affranchir complètement pour des expériences précises. Ces causes d'erreur deviennent bien plus graves encore lorsque l'on opère sur des moteurs à allures vives ou dans lesquels les pressions varient rapidement, tels que les machines à gaz par exemple.

Watt a composé son indicateur d'un petit piston, se mouvant à frottement très doux dans un cylindre, soumis, sur l'une de ses faces, à la pression de la vapeur dans le

cylindre de la machine à explorer et, sur l'autre face, à l'action d'un ressort taré; les flexions de ce ressort, proportionnelles à la pression, s'inscrivent, à l'aide d'un crayon porté par la tige du petit piston, sur une feuille de papier animée d'un mouvement transversal proportionnel au mouvement du piston de la machine en expérience.

Cet appareil a été perfectionné, amélioré dans ses détails, rendu plus exact et plus maniable; mais le principe est resté sans aucun changement. Tous les mécaniciens connaissent parfaitement les indicateurs modernes; il serait donc inutile d'en donner la description. Rappelons seulement les noms de quelques maisons qui se sont fait une spécialité de ce genre d'instruments, et qui en présentaient à l'Exposition des spécimens en général remarquables par leur belle exécution.

En tête de toutes, il convient de signaler la *Crosby Steam gauge and valve Company,* de Boston, Mass. (États-Unis), célèbre dans le monde entier par ses beaux indicateurs du système Richard's, adaptés aux machines rapides, si exacts, si légers, si élégamment agencés.

M. Paul Garnier, de Paris, expose des indicateurs Richard's pour les usages de la marine, fort bien exécutés.

Citons encore l'indicateur du système Martin présenté dans l'exposition du Ministère de la marine, et dans lequel le piston est remplacé par un diaphragme plissé en forme d'accordéon.

M. Victor Lefebvre, de Paris, a apporté, dans la construction de l'indicateur, diverses améliorations : il place notamment le ressort dans une chambre distincte et bien aérée, de telle sorte que ce ressort ne soit plus exposé à l'action de la vapeur, qui peut le détériorer et en modifier l'élasticité.

CHAPITRE XI.

PIÈCES DE MÉCANISMES DÉTACHÉES.

SOMMAIRE.

Généralités.

Pièces forgées et rivées. — Exposition de la *Leeds Forge Company*, de Galloway, de Meunier, de Salarnier. — Pièces soudées de Galloway, de Davey-Paxman, d'Imbert.

Pièces fondues. — Expositions de Burlin, de Barraud, de Lehmann, de Taverdon. — Garniture de piston de Carré. — Chaîne de Benoît. — Pièces en caoutchouc de Lerenard, d'Angus.

Nous décrirons, dans le présent chapitre, quelques expositions comportant des organes isolés ou des pièces d'assemblage de machines.

Une fois arrêtées les dispositions d'ensemble d'une machine, ses grandes lignes, ses proportions générales, l'ingénieur qui en établit le projet doit dessiner les formes définitives de chacun des organes; il est dirigé, dans cette étude, par de nombreuses considérations; en dehors du rôle que l'organe doit remplir dans le fonctionnement de la machine, il y a à tenir compte notamment des efforts à transmettre, de la nature des matériaux et des moyens de les mettre en œuvre.

En ce qui concerne le calcul des efforts, nous n'avons pas de progrès bien notables à constater. La théorie de la répartition des forces entre les divers éléments d'un système matériel, cette science que l'on désigne sous le nom de *résistance des matériaux*, semble avoir concentré toutes ses études sur les problèmes relatifs aux constructions civiles; elle ne fournit au mécanicien que peu d'indications; c'est encore la méthode empirique qui domine d'une manière générale dans l'établissement des organes des machines; le calcul ne fournit, le plus souvent, que des données incertaines et insuffisantes. Il résulte de cet état de choses que, dans bien des cas, et surtout lorsqu'il s'agit de types nouveaux à créer, le mécanicien manque de renseignements et de direction, et que, pris au dépourvu, il doit se contenter d'hypothèses ou d'aperçus, auxquels l'expérience donne parfois de cruels démentis. Il y a là des lacunes sérieuses, qu'il serait fort utile de combler.

En fait de matériaux, les richesses dont on dispose pour la construction des organes de machines se sont notablement accrues depuis l'Exposition de 1878. Les procédés d'élaboration se sont également perfectionnés, et sont devenus à la fois plus puissants et plus précis. En dehors des nombreux exemples que nous avons rencontrés précédemment, on trouve, parmi les pièces de mécanisme détachées, des spécimens fort remarquables de pièces forgées, fondues, rivées ou ajustées.

IMPRIMERIE NATIONALE.

La *Leeds Forge Company*, de Leeds (Angleterre), expose de magnifiques pièces de forge pour chaudières : ce sont des foyers ondulés, des devantures de chaudières, des emboutis de toutes dimensions et présentant les formes les plus compliquées; toutes ces pièces sont d'une exécution absolument supérieure et ont fait l'admiration de tous les visiteurs.

Rappelons également la superbe tôlerie de chaudière exposée par la maison Galloway and Sons, de Manchester, ainsi que les échantillons de brasures et de rivures présentées par MM. Meunier et Cie, de Fives-Lille (Nord). Les anciens établissements Salarnier, de Paris, avaient réuni, dans une vitrine, une collection de rivures, dont les coupes montraient l'exécution irréprochable.

L'assemblage par rivure pour les tôles de chaudières, malgré la perfection d'exécution que permet l'outillage moderne, ne laisse pas que de créer, dans l'appareil, des lignes de fatigue, de moindre résistance. Il serait fort avantageux de pouvoir écarter cet affaiblissement local, dont la conséquence nécessaire est une augmentation d'épaisseur pour toute la paroi, de poids et de prix pour le générateur. On a cherché à rétablir la continuité du métal en assemblant les lèvres de la tôle par soudure de fer sur fer. Il y avait, à l'Exposition, plusieurs spécimens remarquables de ces applications de la soudure; nous pouvons citer, entre autres, les tubes de chaudières de la maison Galloway and Sons, de Manchester, les pièces de chaudière embouties et soudées de MM. Davey, Paxman et Cie, de Colchester (Angleterre), celles exposées par MM. Imbert frères, de Saint-Chamond (Loire). Les procédés de fabrication de ces sortes de soudures sont tenus secrets, ce qui n'a pas pour résultat d'accroître le degré de confiance qu'on leur accorde; quelques mécomptes et accidents se sont produits; il ne semble pas que, dans l'état actuel, la fabrication des soudures se fasse d'une façon tout à fait régulière et offrant toute garantie. L'emploi des chaudières soudées ne s'est pas répandu autant qu'il serait désirable, tout au moins pour les appareils de grande dimension et soumis à des pressions élevées. La chose est regrettable : il y a là à résoudre un problème d'un véritable et sérieux intérêt.

L'art de la fonderie ne semble pas avoir fait, depuis 1878, des progrès bien importants. Cependant on remarquait à l'Exposition de fort belles pièces de fonte.

MM. Burlin et Vallet, de Sainte-Amance (Haute-Saône), présentent, dans leur exposition, des roues d'engrenage, exécutées dans la fonderie que possède M. Burlin à Saint-Dié; le moulage est fait au trousseau, et cependant les pièces sont parfaitement nettes et pures.

On remarquait aussi les belles fontes mécaniques, poulies, engrenages, chaises, exposées par MM. Barraud frères et Cie, fondeurs à Angoulême (Charente).

Comme moulages en métaux, une exposition remarquable était celle de MM. Lehmann frères, de Paris; cette exposition comportait notamment des pièces en bronze phosphoreux, coussinets, robinets, soupapes, etc., d'une grande beauté d'exécution.

M. Taverdon, de Paris, a imaginé des procédés de moulage qui lui permettent de fabriquer, en métal blanc ou autres alliages, des pièces fondues n'ayant besoin d'aucun ajustage ultérieur. C'est ainsi qu'il expose des vis avec leurs écrous, de grand diamètre, venues de fonte et sans retouche, et qui se vissent avec une précision parfaite; ces sortes de produits présentent un véritable intérêt pour le bon marché qu'ils permettent d'atteindre.

Nous terminerons ce chapitre par l'examen de quelques organes de machines, originaux comme invention ou comme dispositions.

M. F. Carré, de Paris, a imaginé un système de garniture pour piston de pompe ou de machine à vapeur; c'est une capsule emboutie en métal mince, ayant la forme du cuir de Bramah pour presses hydrauliques, et remplissant à peu près les mêmes fonctions. Cette garniture est appuyée par des ressorts contre la paroi du cylindre; elle se fait en nickel, en acier doux, en cuivre, en alliage. Dans certains cas, et pour lui donner plus d'élasticité, on y pratique de petites fentes obliques, qui permettent à la capsule de s'élargir ou de se restreindre légèrement, et d'épouser ainsi plus exactement les formes de la paroi contre laquelle elle glisse.

Voici (fig. 279) un genre de lien destiné à remplacer la chaîne de Galle et présenté par M. E. Benoît, de Paris, ancienne maison Galle. Les dents de la roue d'engrenage

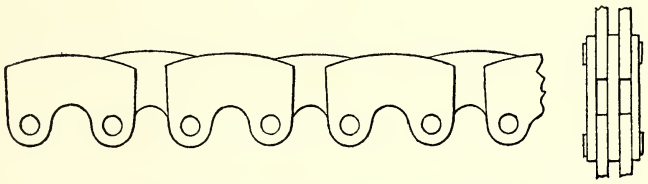


Fig. 279. — Chaîne de Galle, système Benoît.

prennent appui, non plus sur le fuseau, sur lequel s'articulent les maillons, mais sur la jante même de ces maillons. Il résulte de cette disposition plusieurs avantages : la chaîne devient beaucoup plus étroite et plus souple; le tracé des dents d'engrenage n'est plus soumis à la sujétion de s'accommoder à la section circulaire des fuseaux; les contacts peuvent être taillés avec précision et suivant les formes les plus convenables pour obtenir la douceur de la marche. Une de ces chaînes a été appliquée, par une maison de Hollande, à la commande d'une grande pompe centrifuge; la puissance

transmise était de 150 chevaux et la vitesse de la chaîne de 3 m. 36 par seconde; l'appareil s'est fort bien comporté. Ce sont là des conditions auxquelles une chaîne de Galle ordinaire n'aurait certainement pas pu suffire.

Dans la construction des machines, d'autres matières que les métaux entrent dans la constitution des organes. Le caoutchouc est de plus en plus employé pour cet objet, sous forme de tuyaux, de clapets, de courroies, etc. Parmi les expositions des fabricants de caoutchouc, on remarquait les belles pièces de machines présentées par M. Lerenard, d'Alfortville (Seine), et par la maison Angus et Cie, de Newcastle-on-Tyne (Grande-Bretagne).

CHAPITRE XII.

OBJETS DIVERS.

SOMMAIRE.

Mécanismes et procédés divers. — Pédale magique, par Bâclé. — Mouton à vapeur de Lacour. — Isolation des machines, par Anthoni. — Modèles de Radiguet.

Aérostation. — Historique sommaire. — Travaux de Renard et Krebs, des frères Tissandier. — Exposition de Yon, de Lachambre, de Hervé, de l'Académie d'aérostation météorologique.

Publications industrielles d'Armengaud; le Génie civil, la Revue industrielle, la Chronique industrielle; ouvrages de Buchetti, de Desnos; l'Aéronaute.

Associations. — Associations pour prévenir les accidents de machines, de Rouen, des Industriels de France. — Associations de propriétaires d'appareils à vapeur. — Chauffeurs et mécaniciens de France, de la Seine.

Congrès de mécanique.

Conférence sur la mécanique.

Exposition du Comité d'installation de la classe 52.

Lorsque l'on a à traiter un ensemble aussi vaste et aussi complexe que la mécanique générale, si complète qu'ait pu être la classification établie pour coordonner les nombreuses matières à étudier, il est impossible que tous les objets y trouvent leur place. Le présent chapitre a pour but de combler cette lacune. Voici la liste des principaux sujets qui y seront examinés :

Mécanismes et procédés qui n'ont pas trouvé leur place dans les chapitres précédents;

Aérostation et navigation aérienne;

Ouvrages et publications techniques relatifs à la mécanique;

Associations touchant à la mécanique;

Congrès international de mécanique appliquée tenu pendant l'Exposition;

Conférence sur la mécanique;

Exposition du Comité d'installation de la classe 52.

M. Désiré Bâclé, de Paris, expose, sous le nom de *pédale magique,* un petit appareil, fort simple et élégant, qui n'est autre en principe qu'un dispositif présenté par M. Bourdin en 1878, et perfectionné par l'exposant dans ses détails et sa construction. Il a pour objectif principal d'atténuer les graves inconvénients que présente, pour les ouvrières, l'usage prolongé de la machine à coudre et les désordres qu'il produit souvent dans leur santé.

Ces désordres sont la conséquence des mouvements précipités qu'impose la pédale ordinaire, dont la vitesse est nécessairement en relation directe avec celle de la machine, par suite de la liaison desmodromique qui existe entre les organes. A la trans-

mission par bielle et manivelle, les auteurs ont substitué un embrayage, qui constitue, par lui-même, un système mécanique fort intéressant.

Sur l'arbre du volant *AA* (fig. 280) auquel il s'agit d'imprimer le mouvement, sont montés fous deux tambours *CC'*, solidaires des deux disques dentés *DD'*; ceux-ci tournent à l'intérieur d'une poulie *B*, laquelle est fixée sur l'arbre *AA*; sur la figure et pour plus de clarté, on a représenté les disques écartés de la poulie. Les disques *DD'* portent, sur leur pourtour, des échancrures, dans lesquelles se logent des billes en caoutchouc; dans le mouvement direct des disques, les billes se coincent entre la jante de la poulie et la longue face des échancrures; dès lors le disque entraîne la poulie; dans le mouvement inverse, la poulie reste indépendante du disque. C'est un embrayage sans temps perdu, et auquel l'interposition des billes donne une douceur particulière.

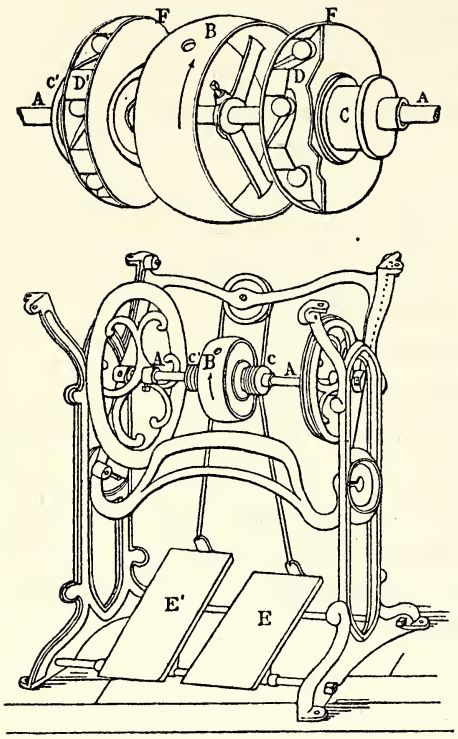


Fig. 280. — Pédale magique Bâclé.

Le dessin d'ensemble représente l'application du système à une machine à coudre : les deux pédales *EE'* agissent alternativement sur les deux bouts d'une corde, qui s'enroule sur les tambours *CC'*, et leur communique ainsi le mouvement. Le jeu du système se comprend facilement : l'ouvrière appuie successivement sur les deux pédales, pour imprimer le mouvement; mais il n'est pas nécessaire que les excursions des pédales soient synchrones avec les révolutions de l'arbre; le volant entretient le mouvement quand les pieds restent immobiles.

Le mode d'embrayage si ingénieux que nous venons de décrire n'est pas absolument nouveau; le même principe avait été appliqué notamment dans l'une des plus anciennes machines à gaz, celle exposée en 1867 par MM. Otto et Langen. Il paraît susceptible de rendre des services dans d'autres applications.

Le mouton à vapeur du système Lacour, construit par M. Decout-Lacour, de la Rochelle (Charente-Inférieure), est représenté par la figure 281. Un lourd cylindre en fonte *A*, portant une frappe *B*, constitue le mouton proprement dit; les oreilles et saillies *aa*, *bb*, lui servent de guidage; il est parcouru par un piston *C*, dont la tige s'appuie, par le bas, sur la tête du pieu à enfoncer. La vapeur est amenée en *c* par un tuyau flexible en caoutchouc, qui relie l'appareil à la chaudière; l'échappement se fait en *d*; la distribution est donnée par un robinet *e*, qu'un ouvrier placé à distance

manœuvre à la main au moyen de cordes. La vapeur étant admise au-dessus du piston soulève le mouton ; au moment de l'échappement, le mouton retombe de tout son poids, et la frappe exerce son action sur la tête du pieu ; par le trou *f* se font la purge et l'admission de l'air ; le trou *g* laisse échapper la vapeur, si, par oubli, l'admission n'est pas fermée en temps utile.

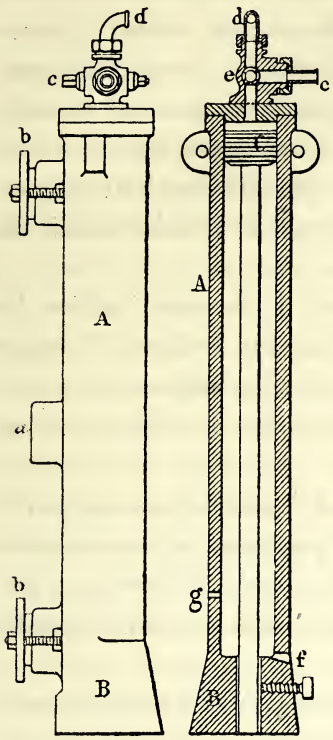


Fig. 281.
Mouton à vapeur système Lacour.

Cette machine extrêmement simple, robuste et pratique, s'est rapidement répandue dans les chantiers de construction.

M. G. Anthoni, de Paris, s'est préoccupé de résoudre un problème fort difficile, celui d'éteindre les bruits et vibrations que les machines transmettent au sol et aux constructions voisines. L'inconvénient est fort grave ; il a donné naissance à de nombreuses réclamations, qui sont devenues de plus en plus vives, à mesure que l'industrie se développait dans les centres habités ; les stations centrales d'électricité, notamment, ont eu, de ce fait, à soutenir des procès fort sérieux et se sont vues obligées à payer des indemnités élevées et à exécuter des travaux onéreux.

Entre les fondations de la machine à isoler et le sol, M. Anthoni interpose des blocs de caoutchouc, convenablement répartis, de dimensions proportionnées à l'effet à obtenir ; ces blocs subissent un serrage calculé, à l'aide de boulons, qui eux-mêmes sont isolés par des rondelles et tubes de caoutchouc, de telle sorte que nulle part il n'y ait contact métallique continu entre la machine et le sol à protéger. On compte déjà d'assez nombreuses applications de ce système, qui, dans beaucoup de cas, a donné toute satisfaction.

M. Radiguet, de Paris, construit des modèles de machines de tous genres et des organes de ces machines. Ces modèles, bien établis et d'un prix modéré, rendent de vrais services pour l'enseignement élémentaire de la mécanique.

Nous arrivons à l'aérostation.

Depuis les célèbres expériences des frères *de Montgolfier*, de *Charles* et *Robert*, depuis les expéditions audacieuses de *Pilâtre des Roziers* et les heureuses tentatives faites par *Coutelle* et *Conté* pour utiliser les aérostats dans le service des armées, l'art de l'aérostation semblait avoir dit son dernier mot et fourni ses résultats ultimes.

Des améliorations de détail furent apportées dans la construction des aérostats, en

vue d'en rendre la manœuvre plus sûre et d'atténuer les dangers du voyage. Mais le navire aérien n'éprouva aucun changement fondamental, ni dans ses dispositions, ni dans ses organes. A l'enthousiasme du premier moment succéda une sorte d'indifférence. La navigation aérienne était considérée comme un spectacle curieux; elle rehaussait l'éclat des fêtes publiques. Quelques voyages scientifiques furent tentés pour explorer les régions élevées de l'atmosphère; des catastrophes retentissantes enveloppèrent de deuil le souvenir de plusieurs de ces expéditions; les résultats obtenus étaient rares, peu décisifs et hors de proportion avec les dangers que couraient les courageux aéronautes. Cet état de stagnation se prolongea pendant toute la première moitié du siècle.

Dans l'intervalle, de nombreux projets avaient vu le jour; on cherchait à utiliser les ballons autrement qu'en les abandonnant au caprice des vents; on s'efforçait de diriger leur course. A part quelques idées ingénieuses ou rationnelles, la plupart de ces propositions ne reposaient sur aucun fond solide; un grand nombre se distinguaient par leur extravagance.

Le siège de Paris et les services signalés que rendirent à la malheureuse capitale de vaillants aéronautes donnèrent à l'aérostation un regain de popularité, et les recherches reprirent avec une ardeur nouvelle. Elles furent poursuivies dans trois directions : perfectionnement de l'aérostat libre, organisation des ascensions captives, et direction des ballons.

C'est surtout pendant la guerre que l'aérostation bien entendue peut rendre des services inappréciables; l'expérience du siège de Paris l'avait démontré de la façon la plus éclatante. Libre, captif ou dirigeable, l'aérostat remplit deux fonctions précieuses pour une armée : il permet de communiquer à grande distance; il renseigne sur tout ce qui se passe dans un rayon étendu. Ce n'est pas une arme de combat, c'est un moyen de communication et d'information; mais il est d'une portée si grande que, dans nombre de cas, rien ne peut le suppléer. Dans tous les pays d'Europe, des écoles d'aérostation militaire furent instituées. En France, les ateliers de Chalais-Meudon, illustrés jadis par les travaux de Coutelle et de Conté, furent réorganisés, et, comme on le verra tout à l'heure, ils ne tardèrent pas à donner de brillants résultats; sous l'aiguillon de la nécessité et de la concurrence, les hommes de guerre se mirent à l'ouvrage, avec ardeur et succès. C'est là un nouvel exemple de l'influence que peut exercer la guerre sur les progrès de l'industrie. De leur côté, les chercheurs civils ne restèrent pas inactifs : moins bien pourvus comme ressources pécuniaires et autres, moins excités par l'espoir d'une utilité immédiate et pratique de leurs travaux, ils n'étaient pas, comme les militaires, enchaînés par le secret professionnel, qui est souvent une bien lourde entrave. De part et d'autre, on pouvait utiliser les matériaux nouveaux et les moyens d'action puissants que l'industrie crée chaque jour.

Le problème fut attaqué sous ses trois formes : ballon libre, ballon captif, ballon dirigeable.

Pour ce qui concerne le ballon libre, on s'ingénia pour trouver des étoffes résistantes, des vernis imperméables et souples; la soupape, le cercle, le filet, tous les organes furent l'objet d'études attentives; la nacelle fut munie d'appareils précis et légers pour la mesure des altitudes et des directions; la photographie a été appliquée fréquemment et avec succès. Le gaz d'éclairage, plus économique, mais plus lourd, continua à être employé dans les ascensions ordinaires; mais pour les usages militaires, on se servit d'hydrogène pur : la fabrication et l'emmagasinement de l'hydrogène, ainsi que les appareils affectés au transport du matériel aéronautique militaire, ont été l'objet de perfectionnements importants.

Dans les armées modernes, le ballon captif est l'outil aérostatique par excellence; c'est l'observatoire qui permet de reconnaître au loin les forces ennemies, leur importance, leurs dispositions, leurs mouvements, et de diriger les coups qui leur sont destinés. Les conditions dans lesquelles un ballon s'élève dans les airs sont loin d'être les mêmes, suivant qu'il est libre ou relié à la terre par un câble. On sait que le moment délicat d'un voyage aérien, le moment dangereux s'il y a du vent, est celui de l'atterrissage, lorsque l'ancre a mordu dans le sol, et que l'aérostat a perdu sa liberté. Pour donner au ballon captif toute la sécurité dont il est susceptible, pour assurer aux officiers qui le montent la stabilité dont ils ont besoin dans leurs observations, on a dû étudier de très près, non seulement le ballon en lui-même, avec ses accessoires et le fluide qui le remplit, mais aussi et surtout ce qu'on appelle l'*appareillage*, c'est-à-dire l'ensemble des liens flexibles, filet, suspentes, cordages, qui rattachent la bulle proprement dite à la nacelle d'une part, et d'autre part au câble de retenue.

L'un des plus beaux spécimens de ballon captif qui ait été construit est le fameux ballon installé, lors de l'Exposition de 1878, par le regretté Henry *Giffard*, dans la cour du Carrousel. Ce ballon, comme on sait, emportait cinquante personnes à 500 mètres de hauteur. Pour réussir une pareille construction, il fallait toutes les ressources d'un esprit éminemment ingénieux, rompu aux pratiques de la mécanique. Le ballon de 1878 fit, sans le moindre accident, un nombre extrêmement grand d'ascensions.

Arrivons à la grande question de la direction des ballons, question irritante, qui n'a cessé de fasciner l'humanité depuis l'invention des aérostats, avant même l'invention des aérostats; et en effet, si loin qu'on remonte dans l'histoire, on retrouve la mémoire de tentatives de vol aérien. Il y a là un effet curieux du sens d'imitation, si profondément empreint dans la cervelle humaine. C'est évidemment le vol des oiseaux qui a, de tout temps, inspiré ce furieux désir de s'enlever et de se diriger dans les airs. Lorsqu'on suit des yeux une hirondelle suspendue entre ciel et terre, ralentissant ou précipitant son vol, le dirigeant à volonté vers le haut ou le bas, à droite ou à gauche, se balançant dans le vent et les nuages, se jouant avec grâce, sans effort, sans travail apparent, il prend un désir de s'élancer à sa suite, et on a peine à concevoir que les forces de l'homme ne puissent pas suffire à de pareils jeux.

Elle est innombrable l'hécatombe des malheureux qui se laissèrent tenter par ce

captivant problème. Henri Giffard eut le premier l'audace de suspendre une machine à vapeur au-dessous d'un ballon rempli de gaz inflammable; il faillit, lui aussi, laisser sa vie dans cette expérience. Plus prudent, plus froid, mieux préparé par ses travaux antérieurs, poussé d'ailleurs par les nécessités de la défense nationale, *Dupuy de Lôme* s'essaya à son tour sur cette question ardue; le ballon qu'il construisit, et qu'actionnait une hélice mue à bras d'homme, put dévier sensiblement de la ligne tracée par le vent.

Les principes posés par Dupuy de Lôme étaient justes, corrects, conformes à la saine mécanique. Ils furent repris, d'une part par MM. Renard et Krebs, officiers du génie, dans l'établissement de Chalais-Meudon, d'autre part par MM. Gaston et Albert Tissandier. Des deux côtés on construisit un aérostat allongé en forme de cigare, avec une hélice, mue par une dynamo alimentée par une pile puissante. L'aérostat de Meudon, nommé *la France*, fit sept ascensions en 1884 et 1885, et cinq fois, après une série d'évolutions, exécutées sous l'action de son hélice, il vint se reposer à son point de départ.

Arrêtons-nous un instant sur cet événement, qui fait époque dans l'histoire de l'aérostation. C'est la première fois que l'on voit une machine, construite par la main de l'homme, s'élever dans les airs en restant maîtresse de ses mouvements et de sa direction. Ce résultat admirable n'est pas, comme l'invention de Montgolfier, le fait d'un coup de génie; il est dû tout entier à une étude lente, patiente, attentive des conditions du problème posé et à une grande ingéniosité dans la recherche des moyens à mettre en œuvre pour le résoudre.

Le ballon *la France* était représenté dans l'exposition du Ministère de la guerre. Voici les principales données relatives à cette remarquable machine :

Longueur de pointe en pointe	$50^{m}42$
Diamètre au fort	8 40
Volume, environ	1,860 m. cub.

Pour conserver à l'enveloppe sa forme en cigare, et éviter les poches qui pourraient se produire et compromettre gravement la stabilité, on a disposé à l'intérieur un ballonnet, dans lequel on peut injecter de l'air à l'aide d'un ventilateur. Le filet est remplacé par une chemise en étoffe, s'appliquant sur la moitié supérieure du ballon, et rattachée à la nacelle par ses bords, au moyen d'un système de cordages, qui évite la tendance à la flexion. La nacelle, construite en bambou et fils d'acier, est allongée comme une coque de navire; elle a 32 mètres de long et 1 m. 30 de largeur au fort; elle est revêtue d'étoffe. L'hélice propulsive est placée en avant et le gouvernail en arrière. L'hélice est actionnée par une dynamo, à laquelle le courant est fourni par une pile, à la fois très légère et très puissante, étudiée spécialement pour cet objet. D'ailleurs, tous les organes de la machine ont fait l'objet d'essais minutieux, qui ont permis

d'en réduire le poids au minimum compatible avec la sécurité. Les principaux de ces poids sont les suivants :

Ballon, ballonnet, chemise et filet	500 kilogr.
Nacelle avec hélice, dynamo et accessoires	570
Batterie de piles et instruments	560
Poids total	1,630

Le ballon étant gonflé d'hydrogène à peu près pur, il reste environ 200 kilogrammes de force ascensionnelle pour les voyageurs et le lest. La vitesse atteinte en air calme a été d'environ 6 m. 50 par seconde, correspondant à un travail électrique estimé de 14 chevaux.

Telle est cette remarquable construction, qui a excité une attention bien légitime. Quoiqu'elle ne ressortît pas de la classe 52, puisqu'elle faisait partie de l'exposition du Ministère de la guerre, il nous a paru nécessaire, dans cette revue des progrès de l'aéronautique, de donner une idée de ce fameux ballon *la France,* le premier, avons-nous dit, qui ait réussi, à la fin de son voyage aérien, à revenir, par ses propres moyens, à son point de départ.

Est-ce à dire pour cela que le problème de la direction des ballons soit définitivement résolu ? On en est encore bien loin ! Un pas considérable a été fait ; mais avant que la navigation aérienne ait acquis assez de puissance et de sécurité pour faire l'objet d'une exploitation régulière, il faudra encore de bien longues études. L'aérostat de Meudon a pu atteindre une vitesse de 6 m. 50 ; c'est dire qu'il faut un air bien calme pour que cette machine puisse remonter dans le vent et conserver la direction voulue.

De plus, ses voyages en circuit étaient de courte durée ; la pile qui servait de réservoir de travail n'emportait de la puissance que pour moins de deux heures.

En l'état, le problème de la navigation aérienne est assez facile à poser, sinon à résoudre. On a besoin avant tout d'un moteur qui soit à la fois puissant et léger ; et il faut observer que dans le poids du moteur on doit comprendre, non seulement la machine motrice, mais encore le propulseur et sa transmission, les chaudières, etc., de plus, les approvisionnements nécessaires pour alimenter l'appareil pendant la durée d'un voyage un peu prolongé, ainsi que les récipients contenant ces approvisionnements.

En second lieu, et c'est là peut-être le point délicat, on connaît mal jusqu'ici les lois qui régissent les mouvements d'un corps se déplaçant dans l'air.

L'étude théorique de ces lois a fait l'objet de mémoires nombreux, de calculs étendus ; les résultats sont absolument divergents. C'est que ces calculs reposent presque tous sur des bases hypothétiques, et par suite incertaines. Ce qui manque, ce sont des données expérimentales qui soient exactes et sûres : la théorie, si habile qu'elle puisse être, ne saurait suppléer l'expérience dans une pareille matière. L'observateur qui saurait me-

surer la résistance qu'oppose l'air au mouvement d'une surface de forme déterminée se déplaçant avec une vitesse déterminée, rendrait à l'aéronautique le plus précieux service. Il mettrait entre les mains du constructeur les coefficients numériques qui sont indispensables pour calculer les meilleures dispositions à donner, aussi bien au propulseur qu'au ballon. Faute de ces données, le problème est jusqu'ici demeuré indécis à un tel degré, qu'il n'est pas encore démontré d'une manière bien positive que les forces de l'homme ne pourraient pas lui suffire, pour se soutenir et se diriger, comme l'oiseau dans l'air, à l'aide d'organes appropriés.

Une fois en possession de ces deux éléments indispensables : un moteur léger, des coefficients de résistance, et aidés des ressources si puissantes que fournit l'industrie moderne, nos mécaniciens ne seront pas embarrassés pour établir la machine volante; ils ont fait plus difficile. Cette machine sera-t-elle un ballon dirigeable? Sera-t-elle un appareil plus lourd que l'air? Les données font défaut pour répondre à cette question.

Décrivons quelques-unes des expositions relatives à l'aérostation; cette étude ne sera pas longue, car c'est dans la classe 66 et non dans la classe 52 que figuraient les appareils aéronautiques les plus importants, ceux qui sont affectés au service des armées. En tête de cette étude, il convient de placer l'exposition de M. Gaston Tissandier, notre collègue du jury, aéronaute et savant, qui a consacré son ardeur et ses talents à l'aéronautique, et fait faire à cette science des progrès importants.

Déjà, en 1881, à l'occasion de l'Exposition d'électricité, M. Tissandier avait construit un petit ballon, auquel une hélice, mue électriquement, imprimait une vitesse de 3 mètres en air calme. Encouragé par ces premiers résultats, M. Gaston Tissandier se décida à tenter une expérience plus importante. Il s'associa avec son frère Albert, et de cette collaboration est résultée la construction que nous allons décrire rapidement.

L'aérostat a la forme d'un cigare; il est pointu des deux bouts; sa longueur est de 28 mètres, son diamètre au milieu de 9 mètres, son volume de 1,060 mètres cubes. Il est revêtu partiellement d'une housse en rubans et cordages, à laquelle se rattachent les pattes d'oie recevant les cordes de suspension de la nacelle; tout le système est raidi par un cadre horizontal, méridien de l'aérostat. La nacelle a la forme d'une cage. L'hélice est à deux branches hélicoïdales; les palettes sont en étoffe de soie vernie, tendue sur une charpente en bois. Le moteur est une dynamo du type Siemens, actionné par une batterie de piles au bichromate de potasse.

Les poids se répartissent comme il suit :

Aérostat, avec sa housse, son cadre et ses cordages	274 kilogr.
Nacelle avec ses engins	150
Appareil moteur, hélice, transmissions, dynamo, piles avec 2 heures et demie d'approvisionnements	280
Total	704

Avec gonflement à l'hydrogène, le surplus de la force ascensionnelle permet d'enlever deux voyageurs et plus de 350 kilogrammes de lest.

L'ascension a eu lieu le 8 octobre 1883, par un temps calme, vent à peine sensible à terre, un peu plus frais à 500 mètres de hauteur. L'appareil a pu tenir tête au vent et se maintenir à peu près stationnaire pendant plus de 20 minutes.

Rappelons ici que M. Gaston Tissandier a été le seul survivant des trois aéronautes qui montaient le ballon *le Zénith;* on sait quelle horrible catastrophe termina cette ascension, dans laquelle Sivel et Crocé-Spinelli trouvèrent la mort. Les frères Tissandier exposaient, dans le pavillon des Arts libéraux, une admirable collection de gravures, d'écrits et objets de toute sorte relatifs à l'histoire de l'aérostation.

M. Gabriel Yon est l'un des plus anciens et des plus distingués de nos aéronautes français; il a apporté un concours actif et efficace à la construction du matériel aéronautique de notre armée, et à l'instruction technique du personnel appelé à s'en servir. Sa principale exposition se trouvait non pas à la classe 52, mais à la classe 66. On y remarquait, entre autres objets d'un grand intérêt, un parc complet de campagne, comprenant l'aérostat, le treuil à vapeur et son câble, et le générateur d'hydrogène. De concert avec M. Godard, M. Yon avait installé dans le voisinage des palais du Trocadéro, dans l'avenue Kléber, un ballon pour ascensions captives, lequel, malgré de fort mauvais temps, a fonctionné sans incident pendant toute la durée de l'Exposition, et emporté dans les airs de nombreux visiteurs.

M. Henri Lachambre, de Paris, expose d'intéressants spécimens de matériel aérostatique, dans la construction duquel il s'est acquis une légitime réputation; plus de cent cinquante ballons civils ou militaires sont sortis de ses ateliers. Il a également établi un appareil fort bien conçu pour la fabrication de l'hydrogène. C'est M. Lachambre qui avait établi les jolis modèles d'aérostats et de montgolfières qui figuraient dans les vitrines des grandes inventions mécaniques.

Dans le pavillon des Arts libéraux, M. Lachambre avait suspendu à la coupole un aérostat, gonflé à l'air, et muni de tous les apparaux dont on se sert dans les ascensions ordinaires. Enfin, vers la fin de l'Exposition, il installa, boulevard de Grenelle, un ballon destiné aux ascensions captives.

Citons encore les expositions de MM. Henri Hervé, de Paris, et celle de l'Académie d'aérostation météorologique.

L'exposition de la mécanique générale comprenait un certain nombre de publications industrielles.

Les journaux industriels ont acquis une grande importance à l'étranger, notamment en Angleterre, en Amérique et en Allemagne; en France, ils sont moins répandus et

ont moins de lecteurs ; néanmoins plusieurs d'entre eux pourraient lutter sans désavantage contre les plus célèbres de leurs concurrents étrangers, sinon par la richesse et la variété des informations, au moins par la solidité et le choix judicieux des notices, par l'exactitude et la belle exécution des dessins.

En tête de ces publications, il faut citer celles qui sortent des bureaux de M. Eugène Armengaud aîné.

La *Publication industrielle des machines, outils et appareils* compte aujourd'hui un demi-siècle d'existence ; elle fut fondée, en 1840, par Armengaud père, et n'a cessé de se développer et d'enrichir l'industrie de documents précieux, remarquables par la perfection des gravures et la précision des renseignements. La même maison a produit plusieurs traités sur les machines les plus importantes : moteurs à vapeur et hydrauliques, machines-outils, etc.

Comme périodiques, mentionnons tout d'abord deux journaux fort répandus : le *Génie civil,* rédigé par un comité d'ingénieurs, et la *Revue industrielle,* éditée par M. Josse, sous la direction de M. Hippolyte Fontaine, rédacteur en chef et membre du jury de la classe 62.

M. Casalonga publie un intéressant journal hebdomadaire, qui porte le nom de *Chronique industrielle.*

M. Jacques Buchetti est l'auteur de plusieurs beaux ouvrages, dans lesquels sont décrits avec soin et détail les types principaux de machines à vapeur.

Les chaudières à vapeur font l'objet de remarquables traités, publiés par M. Édouard Desnos.

Les questions d'aérostation sont étudiées dans un périodique, *l'Aéronaute,* publié sous la direction de M. Abel Hureau de Villeneuve, et organe de la Société française de navigation aérienne.

Les machines rendent à l'humanité des services dont l'importance est incalculable. Mais les forces brutales qu'elles transmettent ont besoin d'être maniées avec prudence et circonspection. Il arrive parfois qu'une machine, abandonnée à des mains insouciantes ou malhabiles, se venge cruellement ; les accidents de machines sont, malheureusement, assez fréquents ; les industriels soucieux de la sécurité de leur personnel se préoccupent de le mettre à l'abri de ces effets déplorables. Des règlements bien étudiés, une surveillance attentive ne suffisent pas toujours ; les ouvriers, vivant au milieu des organes mécaniques, finissent par s'habituer à leur voisinage ; ils oublient ou méprisent les sages précautions qui leur sont imposées, et deviennent trop souvent victimes de leur propre imprudence.

L'un des procédés les plus efficaces pour atténuer la fréquence et la gravité des accidents consiste à constituer un personnel spécial, chargé de rechercher et d'appliquer les moyens les plus propres à garantir la sécurité ; en cette matière, comme en beau-

coup d'autres, la spécialisation des travaux amène promptement les résultats que l'on recherche.

Les dépenses qu'entraîne une pareille organisation ne laissent pas d'être élevées. Pour en diminuer la charge, les industries similaires se groupent sous forme d'associations et répartissent entre elles les frais occasionnés par le bureau central de sécurité. L'expérience a prononcé : les associations de cette nature, lorsqu'elles sont convenablement constituées et administrées, réduisent dans une large mesure la fréquence et la gravité des accidents. Ces heureux résultats avaient été reconnus et proclamés, lors de l'Exposition de 1878, par le jury de la Mécanique générale : il décernait un grand prix à l'association fondée à Mulhouse en vue de prévenir les accidents de machines, représentée par son éminent et regretté fondateur Engel-Dolfus. Cette voie féconde a été suivie dans quelques centres industriels; nous voyons représentées, en 1889, plusieurs sociétés poursuivant le même but.

L'Association pour prévenir les accidents de fabrique, de Rouen (Seine-Inférieure), figure à l'Exposition par ses comptes rendus et publications; elle a adopté la belle devise : *Sécurité de l'atelier*. L'association de Rouen a été fondée en 1879; après une période d'essai de trois années, qui a démontré l'efficacité de ses efforts, elle s'est prorogée pour une durée de dix ans.

Elle est administrée par un conseil composé de quelques-uns des principaux industriels de Rouen; les opérations sont exécutées sous la direction d'un ingénieur, M. Poan de Sapincourt. Le but qu'elle se propose est « de rechercher les diverses causes d'accident, de les classer, d'étudier les différents moyens préventifs employés ou proposés, et de les répandre parmi les adhérents par des visites, des rapports particuliers et des publications ».

Du compte rendu de l'assemblée générale de 1888, nous tirons les chiffres suivants :

La surveillance de l'association s'étend à :

Broches de filatures	323,720
Métiers à tisser	4,610
Machines à imprimer	28
Tables d'impression	42
Machines à papier	2
Machines à planches plates	2
Établissements industriels divers (blanchiments, teintures, produits chimiques, constructions mécaniques, apprêts de cuir, imprimeries)	22

Les statistiques de l'Association démontrent que la surveillance qu'elle exerce a pour effet de réduire le nombre des accidents de machines dans une proportion pouvant atteindre 64 p. 100.

L'Association des industriels de France pour préserver les ouvriers des accidents du

TRAVAIL (ancienne Association parisienne des industriels) a son siège à Paris; elle a été fondée en 1883, sur l'initiative de MM. CHAIX et Émile MULLER, et organisée sur le modèle de l'association créée à Mulhouse, en 1867, par ENGEL-DOLFUS. Elle est présidée par M. PÉRISSÉ; la direction technique est confiée à MM. MAMY et THAREAU; elle doit étendre son action sur toute la France; en 1889, elle comprend sept groupes adhérents créés dans les principaux centres industriels : Paris, Lille, Reims, Saint-Quentin, Nancy, Lyon et Marseille, représentant dix-sept départements. Elle comporte 664 membres; les établissements compris dans son ressort comptent 80,000 ouvriers.

Les explosions et accidents auxquels sont exposés les appareils à vapeur et les terribles catastrophes qui en sont la conséquence fréquente, ont depuis longtemps appelé l'attention des industriels soucieux de leur responsabilité. En 1855, l'illustre W. FAIRBAIRN fondait, à Manchester, la première société ayant pour objet de prévenir les accidents, sous le nom *MANCHESTER STEAM USERS ASSOCIATION*. Cet exemple ne tarda pas à être suivi; d'autres sociétés furent fondées, parmi lesquelles la plus importante est la *BOILER INSURANCE AND STEAM POWER COMPANY*, dont la constitution date de 1859, et qui étend sa surveillance sur près de 5,000 chaudières.

En France, la plus ancienne de ces sociétés est l'ASSOCIATION ALSACIENNE, qui fut fondée, en 1867, sous le patronage de la Société industrielle de Mulhouse et dont les travaux ont servi de modèle pour toutes les autres fondations de même nature qui se sont développées sur notre territoire. Depuis cette époque, de nombreuses associations ont été créées dans tous les pays industriels.

En 1888, il existait en France dix associations de propriétaires d'appareils à vapeur, ayant leur siège à Lille, Lyon, Amiens, Paris, Mulhouse, Rouen, Nantes, Marseille et Reims; le nombre des établissements associés était de 3,085 et celui des chaudières inscrites de 9,993, représentant plus de 15 p. 100 du total des chaudières fixes françaises.

Les associations françaises ont essentiellement le caractère technique; elles ont pour objet principal la sécurité dans l'emploi des appareils à vapeur; mais elles se préoccupent aussi de l'économie et du bon usage de ces appareils.

Pour atténuer les dangers que peuvent présenter les chaudières, le moyen le plus efficace, une fois l'appareil convenablement construit et établi, consiste dans une surveillance sérieuse et attentive, ayant pour corollaire un entretien soigné et des réparations bien faites et faites en temps utile. Les associations assurent cette surveillance par des inspections régulières, opérées par un personnel spécial et expérimenté. Les inspecteurs délégués à cet effet visitent périodiquement les chaudières inscrites. Ces visites sont intérieures et extérieures. Les visites extérieures permettent de constater si les appareils de sûreté sont en bon état, l'alimentation régulière et le feu convenablement conduit. Les visites intérieures ont une importance plus grande encore. En pénétrant dans la chaudière, préalablement nettoyée, l'inspecteur en examine toutes les parties;

il découvre les vices graves, qui compromettent la sécurité, tels que corrosions, amincissement des parois, fissures, coups de feu, défauts de montage, etc.

Les associations françaises de propriétaires d'appareils à vapeur s'étaient réunies en syndicat, et présentaient, à l'Exposition, une collection du plus haut intérêt : c'étaient des spécimens des principaux défauts que l'on constate dans l'inspection des générateurs en service; l'examen de ces spécimens démontrait, de la manière la plus saisissante, la multiplicité et la gravité des accidents auxquels une surveillance attentive permet d'échapper.

La sécurité procurée par une pareille surveillance est en réalité très grande; les explosions de chaudières inscrites aux associations sont extrêmement rares, et, parmi celles qui se produisent, la majeure partie est attribuable à des imprudences graves commises en service, telles que l'absence d'alimentation et autres analogues.

L'administration française a tenu un juste compte du supplément de sécurité que procure la surveillance des associations; en vertu des règlements récemment promulgués, les chaudières inscrites à ces associations jouissent de dispenses importantes, qui atténuent dans une mesure sérieuse la sévérité des dispositions généralement imposées.

En signalant en temps utile les défauts qui menacent l'existence des chaudières, et en indiquant les réparations à faire avant que ces défauts se soient aggravés, les associations réduisent dans de larges limites les dépenses d'entretien des appareils; en outre, elles assurent d'une manière permanente le bon état des générateurs, ce qui est une condition essentielle d'économie dans la production de la vapeur. Elles contribuent, par leurs conseils et les concours qu'elles instituent, à l'éducation des chauffeurs, dont l'habileté professionnelle est, comme on sait, de première importance au point de vue de l'emploi économique du combustible. Elles étendent également leur surveillance aux machines motrices; leur personnel est dressé à faire les essais de machines, essais à l'indicateur, au frein et de consommation, et les essais de cette nature sont de la plus grande utilité pour réduire le prix de revient de la puissance mécanique dépensée dans les ateliers.

Il existe dans beaucoup de centres industriels des cours professionnels, où s'enseignent les divers métiers; ces cours sont patronnés par des municipalités, des particuliers ou des sociétés; dans nombre de ces cours, il se fait un travail utile et sérieux.

Pour ce qui concerne les cours professionnels de chauffeurs, ils sont d'ordinaire créés et soutenus, soit par des industriels, soit par des associations de propriétaires d'appareils à vapeur. A Paris, deux sociétés ont installé des cours de chauffeurs; elles ont chacune leur journal et étaient représentées l'une et l'autre à l'Exposition. Le Syndicat général des chauffeurs et mécaniciens de France, présidé par M. Guimbert, a pour organe le journal *l'Alliance*. La Fédération centrale des chauffeurs-conducteurs-mécaniciens du département de la Seine a pour président M. Souchet et pour organe le journal *le Denis Papin*.

IMPRIMERIE NATIONALE.

Le Congrès international de mécanique appliquée s'est tenu, du 16 au 21 septembre 1889, dans les salles du Conservatoire des arts et métiers. Il était présidé par M. Phillips, l'éminent géomètre et mécanicien. Les personnalités françaises et étrangères les plus connues dans le monde de la mécanique avaient tenu à honneur de participer à ses travaux; les gouvernements étrangers s'y étaient fait représenter par des délégués spéciaux.

Les principales questions à soumettre à l'examen du Congrès avaient été préparées par un comité d'organisation, et étudiées dans des rapports préparatoires qui devaient servir de base à la discussion. Voici la liste de ces questions et les noms des rapporteurs.

Première question. — Unification du cheval-vapeur. — Spécification de la puissance des générateurs à vapeur. — Rendement. — Rapport de M. Alfred Tresca.

Deuxième question. — Étude sur les essais des fers et des aciers. — Rapport de M. E. Cornut.

Troisième question. — Les machines frigorifiques et leurs applications. — Rapport de M. Richard.

Quatrième question. — Transmission à distance et distribution du travail par les procédés autres que l'électricité. — Rapport de M. Boudenoot.

Cinquième question. — Machines à détente en cylindres successifs. — Rapport de M. A. Mallet.

Sixième question. — Machines thermiques autres que les machines à vapeur d'eau. — Rapport de M. J. Hirsch.

En outre, trois magnifiques conférences ont été faites dans le grand amphithéâtre du Conservatoire :

M. E. Polonceau, ingénieur en chef du matériel et de la traction au chemin de fer d'Orléans, a traité la vaste question des *Progrès réalisés dans les machines à vapeur depuis 1878;*

M. Bour, ingénieur en chef, directeur de l'Association lyonnaise de propriétaires d'appareils à vapeur, s'est occupé des *Progrès réalisés par les Associations de propriétaires d'appareils à vapeur.*

Enfin M. Olry, ingénieur en chef des mines, rapporteur à la Commission centrale des machines à vapeur, a décrit les principaux types de *chaudières à petits éléments* représentés dans les galeries de l'Exposition.

Pour les études de détail, le Congrès s'était divisé en trois sections, s'occupant respectivement des machines à vapeur, des générateurs de vapeur et d'objets divers. Les présentations faites dans les sections ont été du plus grand intérêt.

En séance générale, les délibérations ont porté sur des questions qui sont de la plus haute importance; elles ont abouti à des conclusions, formulées sous forme de vœux, qui ont été soumis aux votes du Congrès et adoptés à une grande majorité. L'ensemble de ces vœux constitue un sommaire des *desiderata* qui s'imposent à la mécanique moderne; nous n'hésitons pas à le reproduire intégralement.

VOEUX FORMULÉS PAR LE CONGRÈS DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE.

I. Les membres du Congrès de mécanique appliquée, après en avoir délibéré, émettent le vœu que le Gouvernement français prenne, auprès des gouvernements étrangers, l'initiative de la réunion d'une commission internationale, ayant pour mission de choisir les unités communes destinées à exprimer les différents résultats des essais de matériaux, et d'introduire une certaine uniformité dans les méthodes d'essais.

II. Le Congrès international de mécanique appliquée émet le vœu qu'il y a lieu d'encourager, par tous les moyens possibles, la création et l'extension de laboratoires d'essais de matériaux et de machines, aussi bien dans les grandes écoles du Gouvernement, dans les grandes administrations gouvernementales ou privées, que dans les établissements d'utilité publique, tels, par exemple, que le Conservatoire des arts et métiers.

III. Comme suite au vœu exprimé par le Congrès international de mécanique appliquée, relativement à l'organisation de laboratoires de mécanique, le Congrès recommande en particulier l'institution de recherches expérimentales précises sur les propriétés physiques des fluides usités dans les appareils à produire le froid.

IV. Le Congrès international de mécanique appliquée est d'avis qu'il y a lieu de supprimer l'expression *cheval nominal.*

V. Attendu qu'il est très souvent difficile ou impossible de déterminer le travail en chevaux effectifs mesurés au frein; attendu que les essais à l'indicateur permettent de déterminer, avec une approximation suffisante en pratique, la puissance d'une machine à vide et en charge, le Congrès émet le vœu que l'on admette de préférence l'expression de la puissance en chevaux indiqués de 75 kilogrammètres par seconde.

VI. Les membres du Congrès international de mécanique appliquée, après en avoir délibéré, émettent le vœu que, par un accord unanime, le langage de la mécanique arrive à se préciser de la manière suivante :

1. Le mot *force* ne sera plus employé désormais que comme synonyme d'effort, sur la signification duquel tout le monde est d'accord. On proscrira spécialement l'expression *transmission de force* qui se rapporte en réalité à la transmission d'un travail, et celle de *force d'une machine,* qui n'est que l'activité de la production du travail par ce moteur, ou, en d'autres termes, le quotient d'un travail par un temps.

2. Le mot *travail* désigne le produit d'une force par le chemin que décrit son point d'application suivant sa propre direction.

3. Le mot *puissance* sera exclusivement employé pour désigner le quotient d'un travail par le temps employé à le produire.

4. En ce qui concerne l'expression numérique de ces diverses grandeurs, pour tous ceux qui acceptent le système métrique, les unités sont les suivantes :

La *force* a pour unité le *kilogramme,* défini par le Comité international des poids et mesures.

Le *travail* a pour unité le *kilogrammètre.*

La *puissance* a deux unités distinctes au gré de chacun : le *cheval* de 75 kilogrammètres par seconde, et le *poncelet* de 100 kilogrammètres par seconde.

5. L'expression *énergie* subsiste dans le langage comme une généralisation fort utile, comprenant, indépendamment de leur forme actuelle, les quantités équivalentes : travail, force vive, chaleur, etc.

Il n'existe pas une unité spéciale pour l'énergie envisagée avec cette généralité. On l'évalue numériquement, suivant les circonstances, au moyen du *kilogrammètre*, de la *calorie*, etc.

6. On se rend bien compte, dans ce qui précède, que ce système présente des différences avec celui qui est adopté maintenant pour l'étude de l'électricité. Les trois grandeurs essentielles de toute homogénéité, au lieu d'être, comme pour les électriciens, la longueur, le temps et la masse, sont ici la longueur, le temps et la force. Il a semblé que, pour les mécaniciens tout au moins, sans vouloir engager une discussion au point de vue de la philosophie des sciences, l'effort était une notion primordiale plus immédiate et plus claire que celle de la masse.

Une conférence a été faite, par l'auteur du présent rapport, le 17 août 1889, au palais du Trocadéro. Le sujet traité était : *La Mécanique générale à l'Exposition de 1889*.

Au milieu du palais des Machines, au pied de l'escalier qui s'élevait en face de l'École militaire, on voyait une exposition d'apparence modeste; c'étaient trois vitrines, d'aspect simple, et dans lesquelles se trouvaient des modèles, accompagnés de fiches, et un tableau. Cette exposition représentait, pour ainsi dire, le résumé historique de la mécanique dans notre pays, la part que nos compatriotes ont prise aux progrès généraux de la mécanique. Les modèles étaient ceux des principaux appareils ressortissant à la mécanique générale et inventés par des Français, ou à l'invention desquels les Français ont pris une part importante. Sur le tableau étaient inscrits les noms de quelques-uns des savants français qui, par leurs méditations, par leurs calculs, par leurs expériences, par leurs longues et patientes investigations, ont établi les assises fondamentales de la mécanique. Cette exposition, présentée au nom et par les soins du Comité d'installation de la classe 52, sous la présidence de M. Lavalley, c'était un modeste hommage rendu à ces chercheurs infatigables, qui ont consacré leurs travaux et leur génie à cette science admirable de la mécanique et contribué dans une si large mesure aux progrès de l'humanité.

Voici les listes des inscriptions portées, tant sur les fiches adjointes aux modèles que sur les tableaux.

GRANDES INVENTIONS MÉCANIQUES FRANÇAISES.

Le système métrique	*Assemblée nationale*	1790
La chaîne de Vaucanson	Jacques de *Vaucanson*	1751
La chaîne de Galle	André *Galle*	1832
La noix d'embrayage	Adolphe *Nepveu*	1840
La balance de Roberval	Gilles Personier de *Roberval*	1670
La presse hydraulique	Blaise *Pascal*	1650
La montgolfière	Joseph-Michel et Jacques-Étienne de *Montgolfier*	1783
L'aérostat	Jacques-Alexandre-César *Charles*	1783
Le bélier hydraulique	Joseph-Michel de *Montgolfier*	1797
La turbine Fourneyron	Claude *Burdin*	1824
	Benoît *Fourneyron*	1832
La turbine Fontaine	Pierre-Lucien *Fontaine*	1840
La roue Poncelet	Jean-Victor *Poncelet*	1824

La chaudière tubulaire	Marc *Seguin*	1827
La chaudière à petits éléments	Julien *Belleville*	1850
Le ressort Belleville	Julien *Belleville*	1861
La soupape de sûreté	Denys *Papin*	1681
Le manomètre métallique	Eugène *Bourdon*	1849
L'injecteur automoteur	Marquis de *Mannoury-Dectot*	1818
	Henri-Jacques *Giffard*	1858
La machine à vapeur à piston	Denys *Papin*	1690
La détente par recouvrement	Benoît-Paul-Émile *Clapeyron*	1842
La détente Meyer	Jean-Jacques *Meyer*	1841
La détente variable par le régulateur	Marie-Joseph-Denis *Farcot*	1836
Le régulateur à bras croisés	Joseph *Farcot*	1854
Le régulateur Foucault	Léon *Foucault*	1864
Le compensateur de régulateur	*Denis* et *Weyher*	1871
La machine à double expansion	Benjamin *Normand*	1856
La machine à triple expansion	Benjamin *Normand*	1872
La navigation à vapeur	Denys *Papin*	1698
	Claude-François-Dorothée, Mis de *Jouffroy d'Abbans*	1776
L'hélice propulsive	Charles *Dallery*	1803
	Le capitaine *Delisle*	1823
	Frédéric *Sauvage*	1832
Le servo-moteur	Joseph *Farcot*	1868
Le marteau-pilon	François *Bourdon*	1839
La machine à gaz	Philippe *Lebon d'Hubersin*	1801
	Pierre *Hugon*	1860
	Jean-Joseph-Étienne *Lenoir*	1860
	Alphonse-Eugène *Beau de Rochas*	1862
La commande des freins à distance	Denys *Papin*	1687
	Désiré *Martin* et Verdat *du Tremblay*	1860
Le câble télodynamique	Ferdinand *Hirn*	1850
Le dynamomètre Morin	Arthur-Jules *Morin*	1831
La mesure de l'élasticité par le spiral réglant	Édouard *Phillips*	1869
Le frein dynamométrique	Gaspard-Claire-Franç.-Marie Riche, baron de *Prony*	1821

LA MÉCANIQUE RATIONNELLE ET EXPÉRIMENTALE.

Salomon *de Caus*	Mort en 1635
René *Descartes*	1596-1650
Edme *Mariotte*	1620-1684
Blaise *Pascal*	1623-1662
Pierre *Varignon*	1654-1722
Guillaume *Amontons*	1663-1705
René-Antoine Ferchaut de *Réaumur*	1683-1757
Jacques de *Vaucanson*	1709-1782
Jean le Rond *d'Alembert*	1717-1783
Pierre-Louis-Georges, comte de *du Buat*	1734-1806
Charles-Augustin de *Coulomb*	1736-1806
Joseph-Louis *Lagrange*	1736-1813
Pierre Simon, marquis de *Laplace*	1749-1827
Gaspard-Claire-François-Marie Riche, baron de *Prony*	1755-1839
Jean-Baptiste-Joseph, baron de *Fourier*	1788-1830
Jean-Baptiste *Biot*	1774-1862

Louis *Poinsot*..... 1777-1859
Joseph-Louis *Gay-Lussac*..... 1778-1850
Louis-Marie-Henri *Navier*..... 1785-1836
Pierre-Louis *Dulong*..... 1785-1838
Dominique-François *Arago*..... 1788-1853
Jean-Victor *Poncelet*..... 1788-1867
Jean-Baptiste-Charles-Joseph *Bélanger*..... 1790-1874
Alexis-Thérèse *Petit*..... 1791-1820
Gaspard-Gustave de *Coriolis*.... 1792-1843
Arthur-Jules *Morin*..... 1795-1880
Nicolas-Léonard *Sadi-Carnot*.... 1796-1832
Adhémar-Jean-Claude Barré de *Saint-Venant*..... 1797-1886
Benoît-Paul-Émile *Clapeyron*.... 1799-1864
Charles-Pierre-Mathieu *Combes*.. 1801-1872
Henri-Philibert-Gaspard *Darcy*... 1803-1858
Henri-Victor *Regnault*..... 1810-1881
Charles *Callon*..... 1813-1878
Henri-Édouard *Tresca*..... 1814-1885
Louis-Dominique *Girard*..... 1815-1871
Jacques-Antoine-Charles *Bresse*... 1822-1883

CHAPITRE XIII.

QUESTIONS GÉNÉRALES ET RÉSUMÉ.

SOMMAIRE.

Division.

Progrès réalisés depuis l'Exposition de 1878. — Générateurs de vapeur, accessoires et foyers. — Machines à vapeur; dispositions américaines; régulateurs; machines spéciales. — Machines à gaz. — Machines hydrauliques élévatoires et motrices. — Gaz sous pression. — Transmissions. — Appareils de levage. — Expositions diverses.

Contribution de divers pays dans les progrès de la mécanique. — États-Unis. — Suisse. — Belgique.

La mécanique en France. — Documents statistiques. — Imitation des machines étrangères. — Esprit d'invention. — Situation des industries mécaniques. — Charges qu'elles ont à supporter. — Défaut de stabilité. — Suspension des grands travaux. — De l'enseignement technique; laboratoires de mécanique.

Résumé.

Nous avons terminé l'étude des principaux objets qui représentaient la Mécanique générale à l'Exposition de 1889. De cet examen de détail, on pourrait sans doute tirer des vues d'ensemble, dégager des enseignements d'une grande portée; on pourrait résumer, pour ainsi dire, la philosophie de cette Exposition.

Un pareil travail serait de la plus grande utilité; mais il dépasserait les limites de nos forces et de notre compétence. Nous n'essayerons pas de remplir un aussi vaste programme. Nous nous contenterons, dans le présent chapitre, de toucher quelques points d'une importance un peu générale.

En premier lieu, nous noterons les principaux progrès réalisés par la mécanique, dans le décennat qui sépare les Expositions de 1878 et de 1889, progrès jalonnés par quelques mécanismes remarquables, dont il convient de mentionner l'apparition.

Nous examinerons ensuite quelle est la part prise dans ces progrès par les divers pays industriels représentés à l'Exposition.

Enfin nous essayerons de tirer de cet examen les conséquences qui peuvent intéresser l'avenir de la mécanique dans notre pays.

Commençons par une revision rapide des progrès d'ordre technique réalisés depuis dix ans.

Pour ce qui concerne les générateurs de vapeur, les types en usage, soit dans l'industrie privée, soit dans les chemins de fer, sont restés les mêmes dans leurs traits généraux. Mais les proportions sont mieux entendues, et la construction a fait de sérieux progrès. L'emploi de l'acier doux s'étend de plus en plus et commence à devenir général; il en est de même de la rivure à plusieurs rangs.

La sécurité dans le fonctionnement des chaudières a largement profité de toutes ces améliorations. D'autres causes encore tendent à la rendre plus complète : les chauffeurs sont plus instruits et apprennent mieux leur métier; une surveillance plus active et plus efficace est exercée sur ces appareils, soit par les industriels, soit par l'administration, soit par les associations spéciales; on constate avec satisfaction que le nombre des accidents tend à diminuer.

Les pressions en usage ne cessent de s'accroître; dans les dix dernières années, l'accroissement des pressions a été plus rapide que par le passé.

Les chaudières à petits éléments, qui jusqu'alors n'étaient employées que rarement, se sont beaucoup répandues; on s'en sert à terre, comme générateurs fixes, et sur mer, soit dans les grands navires du commerce ou de l'État, soit aussi dans des bateaux de plus faible échantillon. Rappelons l'initiative hardie et les études persévérantes dues, en France, à M. Belleville, et, aux États-Unis, à MM. Babcock et Wilcox.

Signalons encore, comme caractéristique bien remarquable des tendances actuelles, les chaudières dites *à vaporisation instantanée,* du système Serpollet.

Comme accessoires de chaudières, il convient de rappeler : les soupapes de sûreté à grande levée, les clapets automatiques de vapeur et les manomètres métalliques destinés à mesurer les pressions très élevées. Les injecteurs ont reçu des formes et des dispositions très variées, suivant les circonstances des services qu'ils ont à faire.

Rien de saillant ni d'original à signaler dans les appareils de combustion. La question de la fumivorité, qui a soulevé jadis tant de controverses, semble endormie. L'usage des combustibles liquides s'est beaucoup développé en Amérique et en Russie.

Arrivons aux machines motrices à vapeur.

Le fait le plus digne de remarque, en cette matière, c'est l'emploi fréquent des allures vives : grandes vitesses de piston, grandes vitesses de rotation.

Le type de transmission généralement adopté est la connexion directe par simple bielle entre le piston et la manivelle; la machine à balancier est de plus en plus abandonnée; il en est de même des autres dispositifs qui ont été en faveur pendant un certain temps. Au point de vue de l'assiette de la machine, les deux dispositions les plus usitées sont : la machine horizontale et la machine en forme de pilon; toutefois, suivant les exigences locales, on donne parfois au cylindre une position inclinée; et même nous avons rencontré l'exemple d'une installation de machine avec arbre à manivelle vertical, établie à Khatatbeh par la maison Farcot.

En ce qui concerne la construction des machines à vapeur, aussi bien dans leurs dispositions d'ensemble que dans les dessins de leurs organes, les exemples fournis par les ingénieurs américains ont exercé une influence profonde. Dans tous les pays industriels, ces exemples ont été imités, et, de ce fait, l'aspect des machines modernes est fort différent de ce qu'il était il y a quelques années. C'est ainsi que le bâti dit *à baïonnette*, si rationnel comme répartition de la matière, a été adopté d'une manière géné-

rale; que les distributeurs cylindriques alternatifs se sont de plus en plus répandus; que les distributions par déclenchement, réinventées par Sickles et Corliss, ont peu à peu remplacé les anciens systèmes et sont adaptées à la plupart des grandes machines fixes de l'industrie. Le principe de ce genre de distribution étant donné, les formes sous lesquelles il est appliqué sont extrêmement nombreuses; mais, jusque dans le détail, l'influence américaine se fait sentir, et plusieurs des grandes maisons de construction européennes se contentent d'exploiter, telles quelles, les dispositions inventées de l'autre côté de l'Atlantique.

A propos de distributions, il convient de rappeler les distributeurs à rotation continue, dont la maison Biétrix a fait de si intéressantes applications : c'est là une des rares nouveautés mécaniques qui, dans ces temps derniers, aient pris naissance sur notre sol.

La lutte entre la machine compound et la machine à un cylindre n'a pas encore abouti à un résultat décisif, du moins en matière de machines fixes. On commence à se servir de la triple expansion.

Dans les installations importantes, on fait quelquefois usage d'un condenseur général, relié par une canalisation aux machines principales, et actionné par un petit cheval indépendant. On se sert également, lorsque l'eau est rare ou chère, de refroidisseurs d'eau de condensation.

Les allures rapides que l'on imprime aux machines à vapeur ont permis de réaliser, dans la construction des régulateurs de mouvement, des simplifications notables; suivant l'exemple donné par les Américains, les régulateurs centrifuges sont souvent installés dans le volant monté sur l'arbre tournant; la puissance de ces régulateurs est considérable, et ils peuvent agir directement sur les excentriques et organes de distribution.

Le turbo-moteur de Parson's, construit et exposé par la Société centrale de construction de machines, a excité vivement l'attention des ingénieurs; c'est la première solution pratique de ce problème, si souvent posé, jamais résolu jusqu'alors, de faire travailler la vapeur, dans un moteur, de la même façon que l'eau travaille dans une turbine.

Le servo-moteur, dont le principe a été imaginé par Joseph Farcot, qui en a fait, en outre, de nombreuses applications, est entré de plus en plus dans la pratique des mécaniciens.

Passons aux machines thermiques diverses.

Les machines à air chaud proprement dites ne sont pas encore complètement sorties de la période des études et des tâtonnements. Au contraire, les machines à gaz reçoivent tous les jours des applications plus étendues et plus importantes. Le moteur de 100 chevaux, exposé par la Compagnie française des moteurs à gaz, en était un magnifique exemple. Tous les moteurs à gaz un peu puissants fonctionnent suivant le cycle à quatre temps; ce cycle a été imaginé par notre compatriote Beau de Rochas; mais, pour qu'il fût adopté d'une manière générale, il a fallu qu'il nous revînt d'Allemagne, sous la garantie et le patronage du docteur Otto, savant éminent, industriel consommé.

Le prix du gaz, dans nos villes, étant fort élevé, les machines à gaz se sont beaucoup moins répandues chez nous que dans les pays étrangers. On a essayé de tourner la difficulté en fabriquant directement, à l'aide de gazogènes, les gaz combustibles destinés à alimenter les moteurs; la question est fort intéressante, mais elle n'est pas encore résolue d'une manière pratique et elle demande de nouvelles études. Pour certaines applications, on fabrique le gaz combustible au moyen de vapeur de pétrole léger; l'emploi de ce fluide éminemment inflammable n'est pas sans présenter quelque danger. Il serait bien à désirer que les recherches poursuivies pour utiliser les pétroles lourds dans les moteurs à explosion fussent enfin couronnées de succès.

En parlant des moteurs à gaz, il n'est pas sans intérêt de rappeler que, dans ces machines, si nouvelles et si imparfaites encore, l'utilisation de la chaleur est beaucoup plus complète que dans les machines à vapeur.

Signalons encore les essais tentés pour employer, comme fluide moteur, les vapeurs de la benzine ou d'autres liquides volatils, ces vapeurs agissant, non plus comme combustibles, mais bien par leur pression, comme la vapeur d'eau dans la machine à vapeur ordinaire.

En fait de machines élévatoires, rien d'important à signaler dans les pompes à bras. En ce qui concerne les grandes pompes à vapeur, la solution remarquable fournie par la maison Worthington a déjà reçu en Europe de nombreuses applications : c'est encore un exemple de l'influence exercée par l'Amérique sur les constructions mécaniques de nos pays. Les pompes centrifuges ont fait l'objet d'améliorations notables; on sait mieux aujourd'hui en varier les dispositions et les adapter aux circonstances du service qu'elles ont à faire; on les établit sur des dimensions de plus en plus larges. Un des plus remarquables exemples d'élévation d'eau par pompes centrifuges est celui de l'usine de Khatatbeh.

Comme moteurs hydrauliques, les turbines tendent à se substituer aux roues. L'utilisation des chutes d'eau ne s'est pas beaucoup développée dans nos pays. Il faut citer cependant les turbines à haute pression, dont il a été fait quelques installations dans les Alpes. La Suisse d'un côté, les États-Unis de l'autre ont, au contraire, commencé à tirer un large et intelligent parti des chutes d'eau puissantes que la nature a mises à leur disposition. De ces deux pays nous arrivent des types de moteurs hydrauliques, fondés sur les principes de mécanique si savamment établis par nos analystes, mais comportant des dispositions nouvelles, étudiées avec une entente parfaite, et que nos mécaniciens se préparent à imiter.

La construction des compteurs d'eau a fait de nouveaux progrès, et l'usage de ces instruments tend à devenir tout à fait général.

L'art de comprimer les gaz et de les utiliser sous des pressions élevées a réalisé de nouvelles et importantes conquêtes. Parmi les gaz comprimés ou liquéfiés qui sont de-

venus d'un emploi courant, citons : l'oxygène, l'ammoniaque, l'acide carbonique, l'acide sulfureux, etc. M. Mékarski a montré les services que peut rendre l'air à haute pression comme réservoir d'énergie; il produit industriellement de l'air comprimé à plus de 1,000 atmosphères. La distribution de puissance par l'air comprimé installée à Paris est, sans contredit, la plus grandiose de celles qui existent.

En ce qui concerne les transmissions d'atelier, le progrès s'est fait principalement par le détail; mais il est loin d'être négligeable. Les vitesses de rotation des arbres de transmission tendent à s'accroître.

Dans quelques ateliers, aux transmissions mécaniques on a substitué avec avantage les transmissions par l'électricité.

Les procédés de graissage se sont notablement perfectionnés. Les huiles minérales sont employées d'une manière courante pour toutes les articulations et, en particulier, pour les frottements sous vapeur. D'excellents appareils sont construits pour distribuer les lubrifiants. Le graissage surabondant avec reprise de l'huile en excès est appliqué dans beaucoup de mécanismes à allures rapides.

Comme appareils de levage, il faut citer les grandes et puissantes grues qui desservent les ports et les usines métallurgiques; puis la manœuvre des grues et ponts roulants par le courant électrique, qui se prête admirablement à ces usages. Les ascenseurs ont pris, dans les maisons particulières, un très grand développement; les ascenseurs installés en Europe ne ressemblent, ni comme comme construction, ni comme fonctionnement, à ceux de l'Amérique. Rappelons les magnifiques mécanismes d'ascenseurs qui desservaient les étages de la tour Eiffel.

Les instruments destinés à la mesure des quantités mécaniques, notamment les tachymètres, ont fait des progrès sérieux, et l'usage de ces instruments devient plus répandu.

En matière d'aérostation, les succès remarquables obtenus dans la direction des ballons méritent d'être notés et sont du plus heureux augure.

La presse industrielle s'est enrichie de quelques publications bien documentées, soigneusement rédigées, et qui ont reçu le meilleur accueil du public spécial auquel elles sont destinées.

Les associations ayant pour objet d'augmenter la sécurité dans le maniement des appareils mécaniques n'ont cessé de développer leur champ d'activité et leur influence bienfaisante.

Nous avons, dans ce qui précède, résumé les progrès accomplis, depuis l'Exposition de 1878, dans les principales branches de la mécanique. Il faut examiner actuellement

quelle est la part prise dans ces progrès par les différents pays industriels, et, tout d'abord, quelle est la nation qui y a pris la part la plus importante.

A cette question, tous les mécaniciens feront sans hésitation la même réponse : en matière de progrès mécanique, ce sont les États-Unis d'Amérique qui ont pris la tête. Une pareille appréciation ne semble, il est vrai, nullement justifiée par l'importance de l'exposition que les États-Unis présentaient dans les galeries du Champ de Mars; mais si les constructeurs américains n'ont mis qu'un empressement modéré à mettre sous nos yeux leurs produits, il n'en est pas moins certain qu'entre leurs mains, la mécanique a fait, depuis dix ans, un pas en avant aussi énorme que surprenant. Comme conception et dispositions, les machines américaines dénotent une étude approfondie des conditions à satisfaire, une appropriation parfaite des moyens mis en œuvre, une vigueur d'invention que rien n'intimide et qui ne se laisse entraver ni par les préjugés ni par la routine, une persévérance dans l'expérimentation qui surmonte tous les obstacles. Les solutions adoptées portent, profondément empreint, le cachet d'une originalité hardie et féconde. Il suffira de rappeler, entre mille autres traits, les innovations remarquables introduites dans l'établissement des machines à vapeur, les nouveaux types de turbines, les systèmes originaux de joints et de coussinets, les ascenseurs, d'un usage si général et dont les dispositions sont si remarquables, etc. Dans un ordre d'idées tout voisin, on n'oubliera pas que les tramways à traction mécanique ou électrique, qui sont encore à l'état d'exception dans nos pays, comptent en Amérique des milliers et des milliers de kilomètres.

Comme exécution, les machines sortant des bonnes maisons américaines peuvent supporter avec avantage toute comparaison.

Elles sont élaborées à l'aide d'outils aussi puissants que précis, qui sont d'ailleurs achetés ou copiés à l'envi par tous les grands constructeurs européens, et qui présentent au plus haut degré les caractères si tranchés du génie américain. Ce n'est pas seulement leur outillage que les États-Unis ont réussi à imposer à l'Europe; l'influence de cette jeune et vigoureuse nation se reconnaît dans toutes les branches de la construction mécanique. En matière de machines à vapeur, de machines hydrauliques, d'appareils de levage, partout nous voyons reproduire autour de nous les modèles américains, imiter les inventions dues au génie des ingénieurs américains, et cela non seulement dans les dispositions d'ensemble, mais souvent aussi jusque dans les moindres détails : les Corliss, les Wheelock, les Worthington, les Otis, et tant d'autres encore ont envahi la mécanique de l'ancien continent.

Il faut d'ailleurs en convenir, les conditions de l'industrie sont, en Amérique, bien autrement favorables que dans nos vieux pays d'Europe : des contrées immenses, indéfinies, à peupler et à organiser, ouvrant à l'activité des ingénieurs des champs d'une ampleur illimitée; pas de dette, pas d'armée, pas de routine, aucun de ces résidus du passé, que les nations européennes traînent si lourdement à leurs pieds; et puis des

richesses naturelles incomparables; un sol non épuisé, la houille, le bois, les métaux, le pétrole. Faut-il s'étonner de la confiance que ce jeune peuple a dans ses forces, de l'audace avec laquelle il s'élance vers l'avenir?

Les jeunes gens qui se destinent à la carrière d'ingénieur trouvent, aux États-Unis, des institutions d'enseignement établies avec une largeur d'idée et une ampleur de moyens scientifiques et matériels dont on n'a aucun exemple chez nous : des chaires nombreuses, bien rétribuées et occupées par des savants de premier ordre; des laboratoires munis des instruments les plus précis et les plus perfectionnés; des usines d'expériences meublées de machines puissantes, et organisées avec un rare talent en vue des recherches et des mesures. C'est dans un milieu pareil, éminemment propre à développer toutes les qualités du technicien, que se préparent ces légions de jeunes mécaniciens, qui, dans quelques années, poursuivant la carrière si glorieusement ouverte par leurs prédécesseurs, vont imprimer à l'industrie de leur pays un nouvel élan, dont il est difficile d'apprécier à l'avance l'intensité et la portée.

Si, dans ce jeune et énergique pays d'Amérique, le présent est si brillant et l'avenir si rempli de merveilleuses promesses, on ne peut revenir sans quelque mélancolie à ce qui se passe sur nos vieilles terres européennes. Ici le spectacle est plus terne, moins encourageant et mélangé de teintes un peu sombres. Sans doute on fait encore chez nous de bonnes et belles machines; mais l'initiative et l'esprit d'invention paraissent s'amortir; ce n'est plus ce généreux et vaillant essor vers les nouveautés mécaniques, qui s'est manifesté avec tant d'éclat vers le milieu du siècle, et qui semble quitter nos pays et traverser l'Atlantique.

Et cependant, parmi les nations voisines, il en est quelques-unes chez lesquelles le progrès est encore sérieux et même rapide; et, chose bien remarquable et digne d'appeler l'attention, ce ne sont pas les peuples les plus importants, ceux qui aspirent à jouer les grands rôles dans l'histoire de l'humanité, qui ont conservé la plus belle part.

La Suisse, pauvre de sol, privée de houille et de minerai, a pris et conservé un rang élevé dans l'art des constructions mécaniques. C'est par la persévérance, l'esprit de suite et l'intelligente distribution du travail qu'elle a su conquérir cette belle situation. Les dix dernières années qui viennent de s'écouler ont apporté à la Suisse la récompense de ses longs efforts; elle a pu enfin commencer à mettre en valeur quelques-unes des chutes d'eau dont la nature l'a si libéralement dotée. Les hautes montagnes contiennent des sources de puissance motrice bien autrement riches et inépuisables que les mines de houille. Mais ces puissances n'étaient pas transportables, ce qui en rendait bien restreinte l'utilisation. L'électricité est un élément nouveau introduit dans la question, et il est plein de promesses; le courant électrique, en transmettant à distance et en distribuant l'énergie, donnera à la puissance mécanique tirée des chutes d'eau la facilité d'emploi et la souplesse qui semblaient être jusqu'ici l'apanage de la vapeur; pour la Suisse, la chute d'eau peut être appelée à suppléer la houille dans une mesure étendue.

Cette corrélation intime entre la chute d'eau et l'électricité, les ingénieurs suisses s'en sont bien vite rendu compte; ils ont compris l'importance des richesses naturelles dont ils disposent, et se sont résolument mis à l'œuvre pour les mettre en valeur. Il n'est guère d'autre pays en Europe où les questions relatives aux emplois industriels des courants aient été mieux étudiées, où les applications de l'électricité aient pris d'aussi larges et d'aussi rapides développements. Des ateliers importants ont pris naissance, qui fabriquent les dynamos et appareils électriques, et en fournissent la Suisse et l'étranger; de tous côtés, les villes, villages et hameaux isolés s'éclairent par l'électricité, les tramways électriques se multiplient, l'électricité se répand sous toutes les formes et pour tous les usages.

Le développement des moyens de transport et de communication est considéré à juste titre comme donnant la mesure de la prospérité industrielle d'un pays. A ce point de vue, la Suisse peut soutenir la comparaison avec les pays les plus avancés; la poste, le télégraphe, le téléphone sont admirablement organisés; en dépit des difficultés souvent énormes que présente le relief du terrain, le réseau des routes et celui des chemins de fer sont très serrés et desservent même des localités de l'abord le plus pénible. Toutes les villes sont sillonnées de tramways, la plupart à traction mécanique ou électrique. N'oublions pas ces merveilleux chemins de fer à crémaillère, si hardis et si originaux, qui sont nés sur le sol suisse, auxquels ils sont admirablement appropriés, qui transportent sans fatigue le voyageur jusque sur les sommets les plus inaccessibles. Ces chemins de fer ont été copiés dans plusieurs pays, mais nulle part ils ne se sont multipliés avec autant de rapidité que sur leur territoire d'origine.

De nombreuses écoles techniques, richement dotées comme enseignement et comme matériel, distribuent aux jeunes ingénieurs une instruction à la fois scientifique et pratique, qui doit les soutenir puissamment dans le cours de leur carrière. Les résultats ainsi obtenus sont des plus remarquables. Les étrangers viennent en foule apprendre la mécanique et les arts de l'industrie. Les ingénieurs sortis des écoles suisses se sont répandus dans tous les pays civilisés, où leur valeur, leur compétence et les services qu'ils rendent sont hautement appréciés.

L'exposition de la Belgique était fort complète et très intéressante. Les constructeurs belges avaient autrefois la réputation, bien ou mal fondée, de livrer des produits remarquables par leur bon marché. Ils ont eu à cœur de montrer qu'ils sont en état d'établir des constructions qui se distinguent par d'autres qualités. Les machines qui figuraient dans l'exposition belge attiraient l'attention par leurs bonnes dispositions, témoignant d'une étude attentive et rationnelle, par une exécution toujours soignée et, pour certaines d'entre elles, de tout premier ordre. Il ne faut pas oublier que la Belgique, sur l'initiative énergique de savants éminents, est récemment entrée dans la voie suivie par d'autres pays industriels, et qu'elle a fondé des laboratoires, où sont étudiés expérimentalement les problèmes si nombreux qui se posent en matière de mécanique.

Je laisse de côté les autres pays et j'arrive immédiatement à la France.

Jetons d'abord un coup d'œil sur les résultats relevés par la statistique. Les chiffres inscrits dans les tableaux ci-après sont extraits des documents officiels publiés par le Ministère des travaux publics et par le Ministère des finances. Nous les avons en outre traduits sous la forme de tableaux graphiques.

Voici tout d'abord le nombre des machines à vapeur existant sur notre territoire; c'est là un criterium assez sûr de la situation industrielle d'un pays; quand les affaires sont bonnes, le nombre des moteurs augmente.

Les chiffres portés au tableau ci-dessous se rapportent à la France continentale. Ils représentent, année par année, depuis 1864 jusqu'à 1889, le nombre et la puissance totale des machines à vapeur employées dans l'industrie privée; dans ce tableau ne sont comprises ni les locomotives ni les machines de navigation.

MACHINES À VAPEUR EMPLOYÉES EN FRANCE PAR L'INDUSTRIE PRIVÉE.

ANNÉES.	NOMBRE DE MACHINES.	FORCE EN CHEVAUX-VAPEUR.	ANNÉES.	NOMBRE DE MACHINES.	FORCE EN CHEVAUX-VAPEUR.
1864	19,724	242,210	1877	35,826	466,084
1865	20,947	255,673	1878	37,590	484,241
1866	22,348	274,798	1879	39,566	516,461
1867	23,435	289,410	1880	41,772	544,152
1868	24,844	306,156	1881	44,010	576,424
1869	26,221	320,447	1882	46,289	611,858
1870	27,088	336,030	1883	48,409	653,531
1871	26,146	315,884	1884	50,252	683,090
1872	27,644	338,328	1885	50,979	694,957
1873	29,194	362,474	1886	52,471	717,718
1874	30,657	382,033	1887	54,034	748,456
1875	32,006	400,756	1888	55,435	774,711
1876	33,412	426,898	1889	56,865	818,390

Le graphique ci-après (fig. 282, p. 672) est la traduction du même tableau.

Les chiffres ci-dessus donnent lieu à quelques observations.

Avant 1870, le nombre des machines s'accroissait annuellement d'environ 1,300 machines à vapeur. Après la guerre, et malgré le retranchement de deux départements riches et industrieux, ce taux d'accroissement se maintient d'abord, puis se développe progressivement, pour arriver au chiffre de 2,200 pendant les années 1880 à 1883; puis il redescend et reste compris, pour la dernière période s'étendant de 1887 à 1889, aux environs de 1,400, différant à peine de ce qu'il était avant la guerre.

Pour ce qui concerne la puissance des moteurs à vapeur, les résultats sont un peu

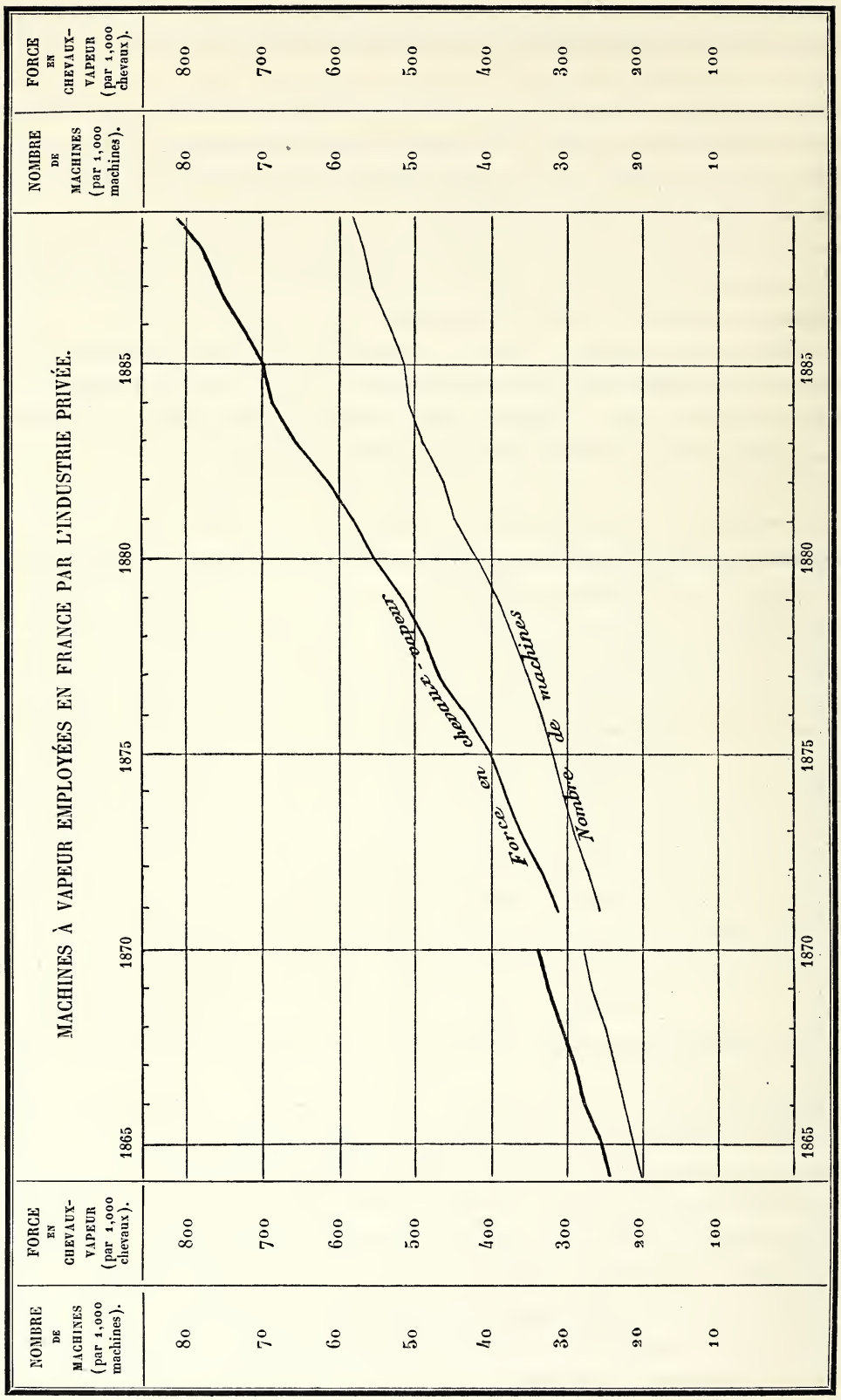

MACHINES À VAPEUR EMPLOYÉES EN FRANCE PAR L'INDUSTRIE PRIVÉE.
NOMBRE DE MACHINES (par 1,000 machines).
FORCE EN CHEVAUX-VAPEUR (par 1,000 chevaux).
80
70
60
50
40
30
20
10
800
700
600
500
400
300
200
100
1865
1870
1875
1880
1885
Force en chevaux-vapeur
Nombre de machines

Fig. 282.

différents : l'accroissement annuel moyen était de 15,000 à 16,000 chevaux-vapeur avant 1870. La guerre nous a pris 20,000 chevaux; mais, à partir de 1872, cette perte était récupérée et au delà. Pendant les trois années suivantes, le taux moyen d'accroissement se tient aux environs de 22,000, pour se relever ensuite et se maintenir, d'une manière à peu près constante, au chiffre moyen de 30,000 chevaux, avec deux ressauts brusques et momentanés : l'un vers 1883, semble être la conséquence des grands travaux publics exécutés à cette époque; l'autre, en 1889, paraît devoir être rattaché aux préparatifs de l'Exposition universelle.

La puissance des machines à vapeur s'accroît, mais très lentement; la puissance moyenne des machines de l'industrie était de 12 chevaux 1/4 en 1864; elle s'est à peine accrue de 2 chevaux depuis cette époque, c'est-à-dire en ving-cinq années.

Examinons maintenant le commerce extérieur de la France; il est représenté, de 1864 à 1889, par le tableau chiffré ci-après et par le graphique fig. 283. Ces chiffres sont ceux du commerce spécial de la France pour les mécaniques et les machines, à l'importation et à l'exportation; ils expriment les valeurs réelles en millions de francs.

MÉCANIQUES ET MACHINES.

COMMERCE SPÉCIAL DE LA FRANCE.

(Valeurs réelles en millions de francs.)

ANNÉES.	IMPORTATIONS.	EXPORTATIONS.	ANNÉES.	IMPORTATIONS.	EXPORTATIONS.
1864	11,3	9,5	1877	37,7	20,8
1865	12,1	8,2	1878	42,3	21,9
1866	15,3	8,3	1879	37,7	22,9
1867	13,3	7,9	1880	42,0	23,9
1868	13,4	9,9	1881	66,5	26,0
1869	14,2	14,9	1882	87,6	28,0
1870	11,0	12,6	1883	93,0	28,3
1871	11,8	15,5	1884	60,1	31,8
1872	24,9	26,6	1885	43,7	27,2
1873	25,6	27,0	1886	38,9	27,3
1874	28,8	25,9	1887	43,5	31,3
1875	32,4	24,9	1888	37,6	35,3
1876	36,2	22,8	1889	44,3	42,3

On voit, d'après ces tableaux, que le commerce extérieur de notre pays s'est maintenu à peu près constant jusqu'en 1870; sauf de légères oscillations, les exportations se chiffraient par une moyenne d'environ 10 millions, contre des importations de 13 millions de francs.

Après la guerre, un mouvement rapide d'accroissement se produit dans les exporta-

IMPRIMERIE NATIONALE.

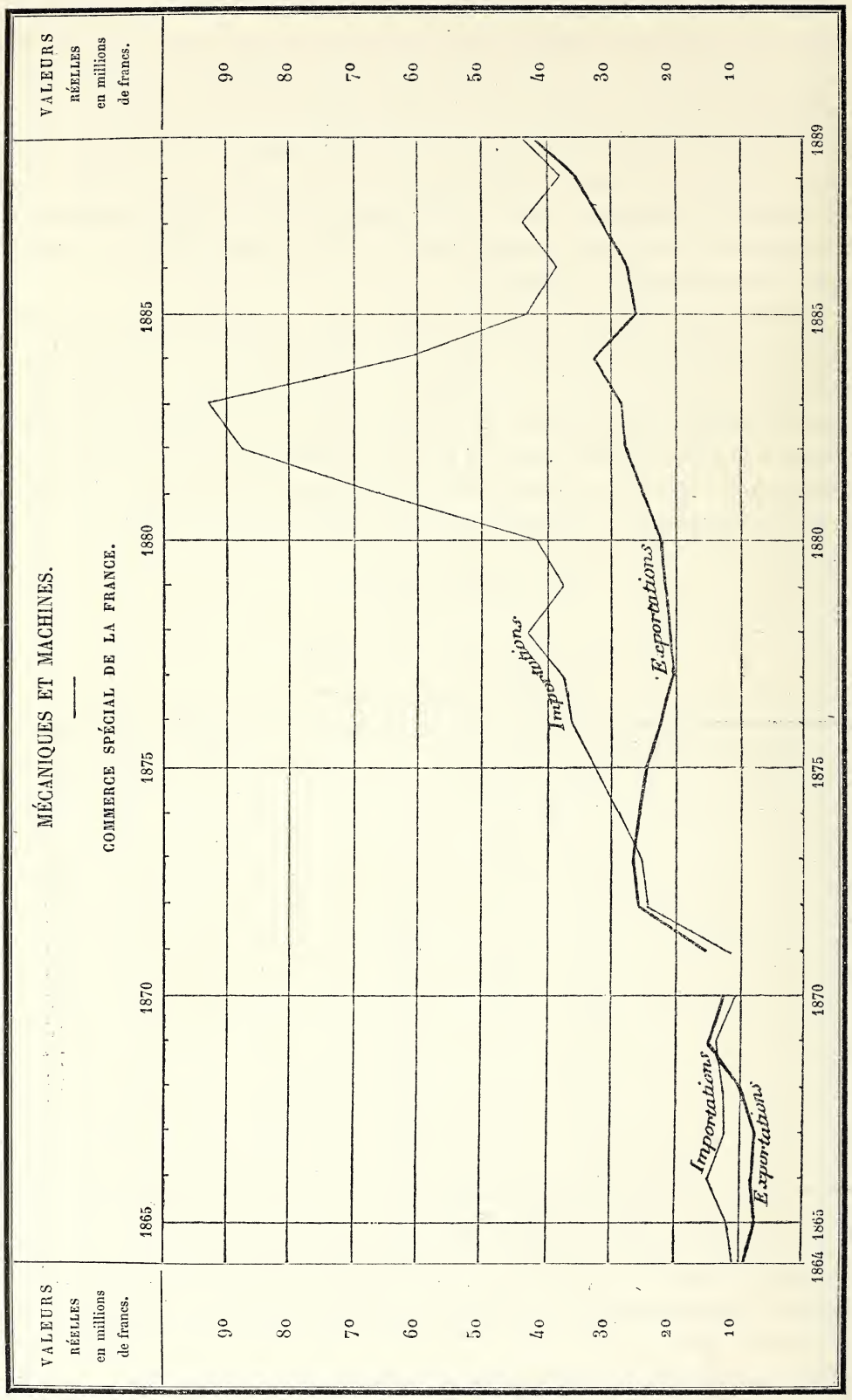

MÉCANIQUES ET MACHINES.
COMMERCE SPÉCIAL DE LA FRANCE.
VALEURS RÉELLES en millions de francs.
90
80
70
60
50
40
30
20
10
1865
1870
1875
1880
1885
1889
1864
Importations
Exportations

Fig. 283.

tions, qui, en 1873, s'élèvent à 27 millions; mais cette augmentation s'arrête pour faire place à une stagnation, qui se prolonge pendant plus de dix années; tandis qu'au contraire l'importation ne cesse de s'accroître; elle atteint, en 1883, le chiffre de 93 millions. Cette importation exceptionnelle est due, pour la majeure partie, à l'achat fait à l'étranger d'un grand nombre de locomotives, correspondant au développement subit donné à notre réseau de chemins de fer; une partie résulte aussi de l'achat de machines-outils, dont nos usines avaient besoin pour suffire aux nouvelles commandes, répondant à la même cause. Mais ce mouvement, un peu artificiel, ne se soutient pas longtemps : dès 1886, les importations retombent à 39 millions, et les exportations se maintiennent à 27 millions. Dans les dernières années qui ont précédé l'Exposition de 1889, une légère reprise s'est produite sur les marchandises exportées, tandis que l'importation reste sensiblement au même niveau.

Le tableau ci-après comporte un résumé comparatif des échanges de notre pays avec les principaux voisins, pendant les années correspondant aux Expositions de 1878 et de 1889.

MÉCANIQUES ET MACHINES.

COMMERCE SPÉCIAL DE LA FRANCE.

(Valeurs réelles en millions de francs.)

DÉSIGNATION.	IMPORTATIONS.		EXPORTATIONS.	
	1878.	1889.	1878.	1889.
Angleterre	15,3	19,6	2,5	2,9
Allemagne	14,1	11,0	2,4	3,6
Belgique	7,0	8,1	4,2	16,1
Suisse	2,9	2,3	1,2	1,7
Autres pays	3,0	3,3	11,6	18,0
TOTAUX	42,3	44,3	21,9	42,3

Nos échanges avec l'Angleterre, l'Allemagne et la Suisse n'ont pas sensiblement changé dans les dix dernières années; au contraire, nos exportations en Belgique et dans les autres pays ont augmenté dans une assez notable proportion; la différence porte principalement sur les objets divers, en fonte, fer, acier ou cuivre; en outre, dans les pays divers, notre exportation s'est augmentée pour les machines agricoles et les machines-outils.

Telle est la situation manifestée par les documents officiels. On ne saurait la considérer comme mauvaise; mais il est impossible de la regarder comme tout à fait satisfaisante. Le progrès se fait encore sentir, mais il est lent et pénible; d'autres pays vont d'un pas bien plus rapide; or, en matière industrielle, il ne suffit pas de marcher, il

importe au plus haut degré de ne pas rester en arrière; ceux qui s'attardent sont bien vite annihilés.

Cette impression est confirmée par d'autres observations encore. Si nous jetons un coup d'œil sur l'exposition de la mécanique française, telle qu'elle se présentait en 1889 dans les palais du Champ de Mars, nous y trouvons de belles et bonnes machines, remarquables aussi bien comme conception que comme exécution. Mais certains symptômes fâcheux frappent au premier aspect : beaucoup de ces machines, parmi les plus parfaites et les plus justement admirées, ont emprunté à l'étranger, soit leurs dispositions générales, soit leurs éléments les plus essentiels : c'est ainsi que les bâtis des machines à vapeur sont, pour la plupart, des bâtis à baïonnette, copiés sur les machines américaines; qu'en matière de distribution de vapeur, nos plus grands constructeurs se bornent à exploiter les brevets ou à exécuter les dispositifs des Corliss, des Wheelock ou des frères Sulzer; que les nouvelles turbines sont la reproduction d'inventions américaines; que les machines à gaz françaises dérivent directement des brevets du docteur Otto; que le moteur rotatif qui a fait, avec tant d'éclat, son apparition à l'Exposition n'est que la reproduction des dispositions imaginées par M. Parson's. Et nous pourrions citer bien d'autres exemples.

Si nous pénétrons dans les ateliers, c'est encore le même spectacle : nous voyons copiés partout les transmissions Sellers, les injecteurs Sellers; nos maisons de construction font venir d'Amérique une partie de leur outillage, ou s'ingénient à copier l'outillage américain.

Serait-ce que l'esprit d'invention, autrefois développé d'une façon si caractéristique chez les mécaniciens français, ait aujourd'hui disparu? que l'imagination mécanique ait chez nous donné ses derniers fruits et soit devenue stérile? Il n'en est rien heureusement, et l'Exposition elle-même nous en fournit des preuves nombreuses. Y a-t-il rien de plus original, de plus vraiment nouveau comme invention, que cette admirable grue étudiée par M. Guyenet pour le montage des éléments de la tour Eiffel? L'ascenseur Édoux, qui relie la deuxième à la troisième plate-forme de la tour, n'est-il pas une merveille d'invention et d'ingéniosité? Que dire encore de la machine de Bourdon pour tarer les manomètres à haute pression, de l'aérostat de Renard et Krebs, de tant d'autres mécanismes, qui pullulent dans l'Exposition, et où se trouve marquée, par les traits les plus éclatants, la tendance permanente de l'esprit français à chercher le nouveau, à défricher le champ de l'inconnu?

Les inventions françaises qui ont vu le jour dans ces dernières années peuvent, on le voit, supporter victorieusement n'importe quelle comparaison, si l'on ne les considère qu'au point de vue technique. Malheureusement, il n'en est pas de même au point de vue commercial. Étudiées en vue de résoudre des problèmes particuliers et restreints, ces admirables machines n'ont pas eu l'expansion immense et fructueuse qu'ont prise

les appareils d'un usage plus général, tels que la machine Corliss ou la pompe Worthington.

C'est qu'en effet la question est toute différente : pour étudier et construire une machine unique, qui satisfasse aux conditions d'un programme précis et spécial, il faut de la science, des connaissances techniques, de l'invention. Mais s'il s'agit d'établir, sur une idée donnée, une série de types de machines, susceptibles de s'adapter à tous les cas, infinis en nombre et en variétés, qui s'offrent dans les applications, alors les qualités personnelles de l'ingénieur, qui sont toujours nécessaires, ne peuvent suffire à elles seules. Il y faut en outre des études prolongées, des essais, des tâtonnements, des retouches; il faut établir et multiplier les modèles, monter l'outillage, organiser la fabrication, la publicité et la vente. Watt a mis près d'un demi-siècle à établir la machine à vapeur industrielle; Bessemer a dépensé des millions avant de pouvoir faire fonctionner pratiquement son convertisseur; la *Fusée,* de Stephenson, n'a été que la résultante de longs et persévérants travaux; l'enfantement de la chaudière Belleville a duré plus de vingt-cinq années. Les idées que sème le génie des inventeurs ont besoin, pour se développer, de beaucoup de temps et d'un terrain favorable. Elles meurent avant de germer, si les circonstances ambiantes ne leur sont pas propices.

Or, dans notre pays, la situation des industries mécaniques est loin d'être satisfaisante. Les affaires sont lourdes, pénibles à trouver et à conclure; les bénéfices se font de plus en plus réduits, et, au moindre mécompte, se changent en pertes. Nous avons vu, symptôme grave, plusieurs de nos maisons de construction disparaître, sans que d'autres, plus jeunes, essayassent de combler le vide. Depuis une vingtaine d'années que cette sorte d'affaissement a commencé à se faire sentir, on espère chaque jour une reprise, et cette reprise se fait toujours attendre. Le malaise, qu'on était tout d'abord tenté de regarder comme une crise passagère, n'a fait que s'affirmer; il passe à l'état chronique.

Dans de pareilles conditions, la réserve à laquelle se condamnent nos constructeurs n'a rien qui doive surprendre. Se livrer à la longue et coûteuse préparation qui doit précéder la mise en circulation d'une invention nouvelle, s'exposer aux risques et aux hasards, immobiliser des capitaux considérables, tout cela peut se faire quand les affaires sont faciles et prospères; mais lorsque, comme aujourd'hui, les vents sont contraires, on serre les voiles, on reste en panne et l'on attend : ce n'est pas dans les temps actuels que Belleville eût entrepris ses longues et audacieuses études.

Cette atonie générale de nos industries mécaniques, il importe d'en résumer les principales causes; il y a là un intérêt de salut public, qui doit faire taire toute autre considération. Ces causes ne sont pas difficiles à discerner; plût à Dieu qu'il fût aussi facile d'y porter remède !

De ces causes, les unes sont d'ordre général et étendent leur influence sur l'en-

semble de l'industrie nationale; d'autres agissent plus spécialement sur les industries mécaniques et la construction des machines.

Parmi les causes d'ordre général, il faut mentionner, en premier lieu, les charges énormes qui pèsent sur toutes nos industries; ces charges se manifestent sous la forme d'impôts de toute nature, directs ou indirects, perceptions variées à l'infini; mais elles finissent, en passant par mille voies détournées, par retomber tout entières sur les producteurs du travail national. Ces impôts, l'État est bien obligé de les percevoir pour faire face à son tour aux charges qui lui incombent, et dont les principales se résument en deux mots : une dette effroyable, une armée écrasante! Terrible héritage qu'ont légué à la génération contemporaine les fautes accumulées de nos prédécesseurs!

Une autre cause générale, et plus importante peut-être, c'est le défaut de confiance en l'avenir, qui se manifeste en traits distincts dans la marche de nombreuses industries. La création d'une usine est une œuvre à portée éloignée; les capitaux qui y sont consacrés ne doivent donner leurs fruits que dans un avenir plus ou moins reculé; le calcul des bénéfices, qui apporteront à ces capitaux leur légitime rémunération, est fondé tout entier sur les conditions probables avec lesquelles on aura à compter pendant un intervalle de plusieurs années. Or, pour que ces calculs offrent une solidité suffisante, il est nécessaire que les conditions dont il s'agit puissent être prévues à l'avance avec quelque certitude. Malheureusement, il n'en est pas ainsi dans notre pays : chaque jour, les données les plus fondamentales sur lesquelles pourraient s'appuyer les prévisions industrielles sont remises en question; aussi bien dans l'ordre politique que dans l'ordre économique ou commercial, qu'il s'agisse des relations intérieures ou des relations avec l'étranger, de législation ou d'administration, des tarifs ou du régime des douanes, des rapports entre employeurs et employés, ce ne sont partout et toujours que changements, bouleversements subits et capricieux, sauts brusques dans l'inconnu, dans l'inétudié, suivis de retours en arrière, non moins brusques, non moins motivés et souvent tout aussi funestes; les engouements changent comme les modes; chaque jour apporte de nouvelles surprises; l'instabilité subsiste seule à l'état permanent.

Faut-il s'étonner que nos industriels, ne sachant sur quoi compter, constamment déçus dans leurs calculs, voyant sombrer leurs prévisions les mieux établies, déconcertés, tracassés, menacés de toute part, sentant le terrain fléchir sous leurs pieds, se croisent les bras et attendent que le calme se fasse?

Cette méthode incohérente de travail n'est pas celle à laquelle sont habitués les mécaniciens. La mécanique est une éducatrice sévère; elle ne tolère ni rêves ni illusions, et fait payer sans pitié les défaillances ou les erreurs. Si une machine est mal établie, soit comme conception, soit comme exécution, elle refuse implacablement ses services, ou se venge plus cruellement encore sur son malencontreux auteur. A cette école dure,

mais saine, le mécanicien apprend bien vite la circonspection; il sait qu'une invention doit être tournée, retournée et examinée maintes fois sous toutes ses faces et dans tous ses détails, avant d'être reconnue comme juste et applicable; avant de modifier un organe, il se rend compte des relations de cet organe avec le reste de la machine et des retentissements éloignés que peut avoir la modification projetée. Il se défie par-dessus tout des songe-creux, des mouvements perpétuels et autres systèmes merveilleux, qui lui sont chaque jour proposés par des inventeurs aussi convaincus que mal préparés, et par cette défiance, il s'attire souvent les reproches les plus violents et les plus immérités. Il se garde de prendre une espérance pour un fait, une parole pour une preuve. Il met la réflexion et le temps pour mûrir ses idées, et n'aborde la nouveauté qu'avec prudence. L'expérience est son guide et son soutien; il ne laisse pas passer un calcul sans le contrôler par des épreuves multipliées; il ne pose le pied qu'après avoir sondé le terrain et en avoir reconnu la solidité. Il faut avoir suivi les travaux qui s'exécutent dans le bureau d'étude d'un mécanicien, pour se rendre compte des précautions, des calculs, des vérifications multipliées dont s'entoure la construction du moindre organe de machine.

Cette méthode est toute terre à terre, lente, lourde, pénible; elle ne laisse place ni aux impatiences, ni aux enthousiasmes irréfléchis; c'est la méthode des Lavoisier, des Joule, des Regnault, des Pasteur. Pour s'en tenir à la mécanique, c'est cette méthode qui a donné naissance à la machine à vapeur, à la locomotive et au bateau à vapeur; c'est-à-dire que c'est elle qui, en rapprochant les hommes, a délivré à jamais l'humanité des deux fléaux qui la désolaient depuis les temps les plus reculés, l'esclavage et la famine; c'est cette méthode qui, en moins d'un siècle, a réalisé dans la société une transformation si radicale et si bienfaisante, que les philosophes n'auraient osé la rêver dans leurs plus audacieuses utopies. Ce n'est pas, hélas! cette méthode patiente et féconde qui a été suivie dans la gestion de nos affaires; et nous avons aujourd'hui la dette, la guerre menaçante, l'instabilité et l'inquiétude; nous avons perdu nos soldats et une partie de notre territoire! Quelles leçons! et si peu écoutées!

Plus que d'autres peut-être les industries mécaniques ont été atteintes. L'extension subite donnée pendant quelques années à la construction des grands travaux publics avait laissé entrevoir un avenir plus favorable; faute d'avoir été prévenus en temps utile, nos constructeurs n'étaient pas préparés à suivre ce mouvement imprévu; pour se procurer les grandes quantités de matériel nécessaire à l'exploitation des nouvelles lignes ferrées, on dut avoir recours aux constructeurs étrangers. Rapidement, nos industries se pourvurent d'un outillage puissant, et se mirent en mesure de répondre aux besoins qui semblaient se révéler. Mais presque aussitôt, le mouvement fut arrêté aussi brusquement qu'il avait commencé; tout le travail d'organisation, tout l'argent qu'il avait coûté se trouvaient dépensés en pure perte. De pareilles secousses, brutales, inattendues, ébranlent tout ce qu'elles touchent et paralysent pour longtemps le travail.

L'extension de l'éclairage électrique a procuré, pendant quelques années, un peu d'aliment à la construction des machines; mais, dans notre pays, les développements de cette industrie nouvelle sont bien lents et paresseux, en comparaison de ce qui se passe chez nos voisins, et surtout en Amérique.

Dans l'état actuel, la construction des voies ferrées ne paraît pas, de longtemps, devoir reprendre beaucoup d'activité, du moins en ce qui concerne les artères principales. Mais il reste beaucoup à faire pour l'établissement du réseau d'intérêt local, des chemins de fer de montagne, des lignes urbaines; la construction des tramways à traction mécanique ou électrique pourrait à elle seule suffire pendant longtemps à entretenir l'activité de nos ateliers. Les milliers de kilomètres de tramways qui sillonnent les rues américaines nous donnent un exemple décisif. Malheureusement, à part quelques grandes villes, les tramways sont loin de se répandre chez nous avec la rapidité qu'exigeraient les besoins de la circulation. A Paris même, les transports en commun, si indispensables à tout le monde, et surtout aux pauvres gens, se font encore, pour la plupart, par des procédés si primitifs, si arriérés, si absolument insuffisants, qu'ils font sourire d'une pitié humiliante les étrangers qui viennent visiter la ville-lumière.

Je dirai, pour terminer, quelques mots sur un sujet qui intéresse au plus haut degré l'avenir de la mécanique dans notre pays; je veux parler de l'enseignement technique et professionnel.

Nos écoles d'arts et métiers possèdent une organisation sage et bien entendue; elles donnent une instruction à la fois théorique et pratique, et les résultats en sont fort remarquables; les jeunes gens sortis de ces écoles deviennent, après une courte préparation, d'excellents ouvriers et de bons contremaîtres.

La situation est moins satisfaisante en ce qui concerne l'enseignement technique supérieur. Soit par insuffisance de ressources matérielles, soit pour toute autre cause, cet enseignement a peu à peu dévié de la voie si magistralement ouverte par les Vaucanson, les Poncelet, les Morin, les Tresca, les Hirn et tant d'autres mécaniciens illustres, qui avaient su conquérir à la mécanique française une place hors de pair. Dans nos écoles supérieures, l'enseignement théorique a pris une place presque exclusive, une importance exagérée; l'expérience et les études pratiques n'y jouent plus qu'un rôle absolument secondaire. Il y a là une grave lacune. La mécanique, il ne faut pas l'oublier, est une science tout autant expérimentale qu'analytique. Elle repose sur deux assises essentielles : d'une part, la science du calcul, d'autre part, la science des faits matériels, appuyée sur l'observation et l'expérience; que l'une ou l'autre de ces bases vienne à faire défaut ou à faiblir, l'équilibre est rompu et l'édifice s'écroule.

C'est surtout en matière d'enseignement qu'il importe au plus haut degré d'éviter cette rupture d'équilibre. L'élève inexpérimenté ne saisit pas du premier coup d'œil la signification réelle des formules algébriques; il ne sait pas encore, à travers ces formules, voir les faits matériels qu'elles ne font que traduire. Après quelque temps d'exer-

cices exclusivement théoriques, il est tenté de regarder l'équation comme le but final, et non comme un instrument intermédiaire. Les exercices manuels, la vue et le maniement des machines sont des moyens merveilleux pour remettre ces jeunes esprits au point, et replacer la théorie elle-même dans son véritable jour.

Nos écoles supérieures sont, malheureusement, mal pourvues d'ateliers et de laboratoires de mécanique; et nous voyons chaque jour les tristes résultats de cette lacune : saturés de théories spéculatives, nos jeunes gens, au sortir des écoles, se trouvent complètement désorientés; mis aux prises avec les applications, ils sentent immédiatement l'insuffisance de leur éducation technique; ils perdent confiance en eux-mêmes et n'inspirent pas confiance autour d'eux. Il leur faut beaucoup de temps et d'efforts, si parfois ils y parviennent, pour acquérir les notions qui leur manquent et se mettre à la hauteur des fonctions qui leur sont dévolues.

Ce n'est pas ainsi qu'est compris l'enseignement technique, ni aux États-Unis ni en Suisse. Dans chaque école de mécanique se trouve un laboratoire de mécanique, c'est-à-dire un véritable atelier, pourvu de moteurs, de transmissions, d'outils, d'appareils précis pour l'expérimentation. Installés aux États-Unis d'une manière grandiose et luxueuse, ces ateliers sont montés, en Suisse, sur un pied plus modeste; mais tout y est bien entendu et organisé en vue des manipulations auxquelles se livrent les élèves.

En dehors des laboratoires destinés aux études journalières, ces beaux établissements comportent des laboratoires spéciaux, réservés aux professeurs ou aux savants qui ont à poursuivre des recherches; souvent ces laboratoires servent à exécuter les essais qui sont demandés par le public, en vue de contrôler les qualités des matériaux, le rendement des machines, etc.

La plupart des pays industriels, l'Allemagne, la Grande-Bretagne, la Belgique, la Russie, ont suivi cet exemple et ont organisé des laboratoires de mécanique.

Et cependant, c'est la France qui, il y a près d'un demi-siècle, avait ouvert cette voie féconde :

Le général Morin, professeur de mécanique au Conservatoire des arts et métiers, avait reconnu l'importance qu'aurait une installation qui permettrait d'expérimenter les machines de l'industrie, d'étudier ces machines à la fois au point de vue de la théorie et de la pratique. Une petite machine à vapeur fut achetée dans ce but en 1843; les premières expériences qui furent faites avec ces appareils remontent à 1847[1].

Ce laboratoire embryonnaire ne tarda pas à se développer; grâce à l'initiative intelligente de Morin, habilement secondé par Tresca, une salle grandiose de machines en mouvement fut installée, de 1852 à 1854, dans une des vastes nefs du Conservatoire. Des dispositions spéciales permettaient d'y faire des expériences exactes sur les machines de toute nature, thermiques, hydrauliques ou autres. C'est dans ce laboratoire qu'ont

[1] *Annales du Conservatoire impérial des arts et métiers*, 1861.

été exécutées la plupart des magnifiques recherches de Morin et de Tresca, qui sont encore aujourd'hui à la base de tous les travaux relatifs à la mécanique appliquée.

Ce laboratoire a disparu en 1885 ; il n'a pas été remplacé depuis cette époque. Cette lacune regrettable a été signalée au Congrès international de mécanique appliquée. Le Congrès en a été vivement ému, et, se plaçant au point de vue élevé des progrès généraux de la science, il a émis le vœu suivant :

Le Congrès émet le vœu qu'il y a lieu d'encourager, par tous les moyens possibles, la création et l'extension des laboratoires d'essais de matériaux et de machines, aussi bien dans les grandes écoles du Gouvernement, dans les grandes administrations gouvernementales ou privées, que dans les établissements d'utilité publique, tels, par exemple, que le Conservatoire des arts et métiers.

Il ne nous convient pas de rien ajouter à ce vœu, qui a réuni, dans un sentiment unanime, les mécaniciens les plus éminents de tous les pays du monde.

Les considérations qu'on vient de lire parlent assez d'elles-mêmes, pour qu'il soit inutile d'en tirer des conclusions formelles. J'ai cru de mon devoir de dire la vérité, fût-elle parfois sévère, telle qu'elle apparaît à tous les regards attentifs et non prévenus. La suprématie que la France a longtemps possédée dans le domaine de la mécanique se trouve aujourd'hui compromise. Pour sauvegarder et maintenir sa situation menacée, notre pays a besoin d'efforts sérieux ; il lui faut surtout beaucoup de clairvoyance, de persévérance et d'esprit de suite. Les autres qualités dont il est si libéralement doté feront le reste.

LISTE DES RÉCOMPENSES

DÉCERNÉES PAR LE JURY DE LA CLASSE 52

AVEC INDICATION DES OBJETS RÉCOMPENSÉS.

HORS CONCOURS.

Albaret (A.). — *France.* — Locomobiles.

Amsler-Laffon (J.) et Sohn. — *Suisse.* — Appareils dynamométriques.

Associations des propriétaires d'appareils à vapeur. — *France.* — Spécimens de défauts et accidents de chaudières.

Berendorf fils (E.-J.). — *France.* — Machines à vapeur.

Bourdon (F.-Édouard). — *France.* — Manomètres et garnitures de chaudières.

Bréguet (Maison). — *France.* — Machines à vapeur.

Buffaud (B.) et Robatel (T.). — *France.* — Machines à vapeur.

Crozet et Cie. — *France.* — Organes de machines.

Dehaître (F.). — *France.* — Gazogène.

Farcot (Joseph). — *France.* — Machines à vapeur. — Pompes centrifuges.

Garnier (Paul). — *France.* — Compteurs et indicateurs.

Gautreau (Théophile). — *France.* — Locomobiles.

Godillot (Alexis). — *France.* — Foyers fumivores.

Gotendorf et Cie. — *France.* — Moteurs à gaz et compteurs.

Hignette (Jules). — *France.* — Paliers graisseurs.

Legat et Herbet. — *France.* — Appareils mécaniques.

Panhard et Levassor. — *France.* — Moteurs à vapeur et à gaz.

Paraf frères. — *France.* — Courroies en coton.

Perret (Michel). — *France.* — Foyers de chaudières.

Piat (Albert). — *France.* — Organes de transmission.

Poullain frères. — *France.* — Courroies.

Quillacq (Auguste de). — *France.* — Machines à vapeur.

Quillacq (A. de) et Meunier (Ém.). — *France.* — Machines à vapeur et pompes.

Revue industrielle. — *France.* — Publication technique.

Rouart frères et Cie. — *France.* — Moteurs à gaz et à pétrole.

Sautter-Lemonnier et Cie. — *France.* — Machines à vapeur. — Appareils de levage.

Section française de la classe 52. — *France.* — Modèles et documents relatifs à la mécanique.

Société centrale de construction de machines. — *France.* — Machines et chaudières à vapeur.

Tissandier (Gaston). — *France.* — Appareils aéronautiques.

GRANDS PRIX.

Babcock et Wilcox Co. — *Grande-Bretagne.* — Générateurs de vapeur.

Belleville et Cie. — *France.* — Générateurs de vapeur.

Bon et Lustremant. — *France.* — Appareils de levage.

Brasseur (Victor). — *France.* — Machines à vapeur.

Carels frères (Alph. et G.). — *Belgique.* — Machines à vapeur.

Compagnie de Fives-Lille. — *France.* — Machines à vapeur. — Appareils de levage. — Pompes.

Édoux (Léon). — *France.* — Ascenseur de la tour de 300 mètres.

Escher Wyss et Cie. — *Suisse.* — Machines à vapeur et machines hydrauliques.

Galloway (W. and J.) and Sons. — *Grande-Bretagne.* — Générateurs de vapeur.

Guyenet (Constant). — *France.* — Appareils de levage.

Meunier et Cie. — *France.* — Générateurs de vapeur.

Naeyer (De) et Cie. — *Belgique.* — Générateurs de vapeur.

Rieter (Joh.-Jacob) et Cie. — *Suisse.* — Turbines et transmissions.

Société alsacienne de constructions mécaniques. — *France.* — Machines à vapeur.

Sulzer frères. — *Suisse.* — Machines à vapeur.

Worthington Pumping Engine Co. — *États-Unis.* — Pompes à vapeur.

MÉDAILLES D'OR.

American Elevator Co (Compagnie américaine d'ascenseurs). — *États-Unis.* — Ascenseurs.

Anciens établissements Cail. — *France.* — Ascenseurs de l'hôtel des Postes.

Armengaud aîné (Eugène). — *France.* — Publications industrielles.

Armington et Sims. — *États-Unis.* — Machines à vapeur.

Association des industriels de France pour préserver les ouvriers des accidents. — *France.* — Modèles et publications.

Association rouennaise pour prévenir les accidents de fabrique. — *France.* — Modèles et publications.

Ateliers de construction d'OErlikon (Zurich). — *Suisse.* — Machines à vapeur.

Berger-André (Louis-G.-J.). — *Alsace-Lorraine.* — Machines à vapeur.

Biétrix (V.) et Cie. — *France.* — Machines à vapeur.

Bollée fils (Ernest-J.). — *France.* — Béliers hydrauliques.

Bonjour (Claude). — *France.* — Distribution de vapeur et organes de machines.

Boulet (J.) et Cie. — *France.* — Machines à vapeur.

Brault, Teisset et Gillet. — *France.* — Turbines.

Brissonneau, Deroualle et Lotz (Alphonse). — *France.* — Appareils à comprimer l'air.

Brotherhood (Peter). — *Grande-Bretagne.* — Compresseurs d'air et moteurs.

Brown (C.-H.) et Cie. — *États-Unis.* — Machines à vapeur.

Buss et Cie. — *France.* — Régulateurs et tachymètres.

Caillard frères. — *France.* — Appareils de levage.

Chaligny et Cie. — *France.* — Machines à vapeur.

Chameroy (Augustin-E.). — *France.* — Bascules.

Compagnie des fonderies et forges de l'Horme. — *France.* — Machines à vapeur.

Compagnie française des moteurs à gaz. — *France.* — Machines à gaz et à essence.

Cordier aîné (E.-J.). — *France.* — Fumisterie de chaudières.

Crosby Steam Gauge and Valve Co. — *États-Unis.* — Indicateurs de pression et accessoires de chaudières.

Crossley brothers (Limited). — *Grande-Bretagne.* — Machines à gaz.

Dandoy-Maillard, Lucq et Cie. — *France.* — Machines à vapeur.

Davey-Paxman and Co. — *Grande-Bretagne.* — Machines à vapeur.

Deschiens (J.-Eugène). — *France.* — Compteurs et enregistreurs.

Domange (A.). — *France.* — Courroies.

Dulac (Louis). — *France.* — Générateurs de vapeur et accessoires de chaudières.

Dumont (Louis). — *France.* — Pompes centrifuges.

Dyckhoff (Rudolph). — *France.* — Machine à vapeur.

Feray et Cie. — *France.* — Machines hydrauliques élévatoires.

Fontaine. — *France.* — Générateurs de vapeur.

Gaillet (Paul). — *France.* — Épuration des eaux.

Génie civil (Le) (Revue générale des industries françaises et étrangères). — *France.* — Publication technique.

Halot (Émile et Jules) et Cie. — *Belgique.* — Pompes de compression.

Hoyois (Alfred). — *Belgique.* — Machine à vapeur.

Hydraulic Engineering Co. — *Grande-Bretagne.* — Appareils de levage hydrauliques.

Imbert frères. — *France.* — Récipients d'air et chaudière en tôle soudée.

Jean (G.) et Peyrusson. — *France.* — Machine à vapeur.

Joy (David). — *Grande-Bretagne.* — Distribution de vapeur.

Le Blanc (Jules). — *France.* — Machines à vapeur.

Lecouteux (H.) et Garnier (E.) — *France.* — Machines à vapeur.

Mégy, Écheverria et Bazan. — *France.* — Appareils de levage.

Mékarski (L.). — *France.* — Appareils à air comprimé.

Meunier (Émile-J.-L.). — *France.* — Turbines.

Morane (F.) jeune. — *France.* — Pompes, presses hydrauliques et accumulateurs.

Muller et Roger. — *France.* — Robinetterie.

Olry, Granddemange et Coulanghon. — *France.* — Machines à vapeur.

Otis brothers and Co. — *États-Unis.* — Ascenseurs de la tour de 300 mètres.

Parenty (Henry-L.-J.). — *France.* — Compteurs et distributeurs d'eau.

Powell (Thomas). — *France.* — Machines à gaz.

Richard frères. — *France.* — Appareils enregistreurs.

Romilly (Félix de). — *France.* — Machine à faire le vide.

Roser (Nicolas). — *France.* — Générateurs de vapeur.

Roux, Combaluzier et Lepape. — *France.* — Ascenseurs de la tour de 300 mètres.

Royer (François). — *France.* — Turbines.

Schneider et Cie. — *France.* — Machine à vapeur.

Société anonyme des ateliers de construction de la Meuse. — *Belgique.* — Machine à vapeur.

Société anonyme des générateurs inexplosibles (système A. Collet et Cie). — *France.* — Générateurs de vapeur.

Société anonyme *Électricité et Hydraulique.* — *Belgique.* — Turbines et ventilateurs.

Société anonyme *le Phénix* pour la fabrication des machines et mécaniques. — *Belgique.* — Machine à vapeur.

Société des établissements Carion-Delmotte. — *France.* — Ascenseurs de la tour de 300 mètres.

Société suisse pour la construction de locomotives et machines. — *Suisse.* — Machines à vapeur.

Steinlen et Cie. — *Alsace-Lorraine.* — Machines à vapeur.

Straight Line Engine Co. — *États-Unis.* — Machine à vapeur.

Thirion (Antoine-A.). — *France.* — Pompes à vapeur et machines à comprimer les gaz.

Trayvou (B.). — *France.* — Appareils de pesage.

Warin. — *France.* — Machine à froid.

Wheelock (Jérôme). — *États-Unis.* — Système de machine à vapeur.

Windsor (E.-W.). — *France.* — Machine à vapeur.

Yon (Gabriel). — *France.* — Matériel aéronautique.

MÉDAILLES D'ARGENT.

Angus (George) and Co. — *Grande-Bretagne.* — Courroies.

Ateliers de construction de Creil (Daydé et Pillé). — *France.* — Cheminée métallique.

Aubert (Alexandre). — *France.* — Machines à vapeur.

Audemar-Guyon. — *France.* — Pompes à piston.

Badois (E.). — *France.* — Compteurs d'eau.

Bariquand et fils. — *France.* — Compteurs d'eau.

Barraud frères et Cie. — *France.* — Pièces mécaniques.

Bénoît (A.-Ernest). — *France.* — Chaîne de Galle.

Bisson (Fernand et Cie). — *France.* — Compteurs et distributeurs.

Bonard. — *France.* — Pulsomètres et béliers hydrauliques.

Bonnet, Sparzin et Cie. — *France.* — Générateurs de vapeur.

Borssat (François). — *France.* — Machines à vapeur.

Breloux (B.) et Cie. — *France.* — Locomobiles.

Brouhot et Cie. — *France.* — Locomobiles.

Buchetti (Jacques). — *France.* — Publications techniques.

Burgin (Émile). — *Suisse.* — Machines à vapeur.

Burlin (Édouard) et Vallet (Lucien). — *France.* — Engrenages.

Buzelin (F.-Jules). — *France.* — Machines à vapeur.

Chaudré (F.-N.). — *France.* — Indicateur de niveau.

Cleuet (Victor). — *France.* — Purgeurs et détendeurs.

Colombier (Pierre). — *France.* — Robinetterie.

Compagnie continentale d'exploitation des locomotives sans foyer. — *France.* — Régulateur et détendeur.

Compagnie des entrepôts et magasins généraux de Paris. — *France.* — Ascenseur pour wagons.

Compagnie française des moteurs à air chaud. — *France.* — Moteurs à air chaud.

Compagnie parisienne de l'air comprimé. — *France.* — Fabrication et emploi de l'air comprimé.

Compagnie pour la fabrication des compteurs et matériel d'usines à gaz. — *France.* — Compteurs d'eau.

Cuau aîné et Cie. — *France.* — Pulsomètres et injecteurs.

Damey (J.-Alexis). — *France.* — Locomobiles, dynamomètres.

Darblay père et fils. — *France.* — Machine à vapeur.

Decœur (Paul). — *France.* — Pompes centrifuges.

Degrémont-Samaden. — *France.* — Graisseurs.

Delahaye (Émile). — *France.* — Générateurs de vapeur. — Moteur à gaz.

Delaloé (Léon-A.). — *France.* — Machine à essayer les métaux.

Delettrez (G.). — *France.* — Graisseurs.

Dervaux et Cie. — *Belgique.* — Épurateur d'eau.

Devaux et Daclin. — *France.* — Manomètres.

Dion (De), Bouton et Trépardoux. — *France.* — Générateurs de vapeur.

Douane, Jobin et Cie. — *France.* — Machine à vapeur.

Douglas (W. et B.). — *États-Unis.* — Pompes et béliers hydrauliques.

Ducomet (J.). — *France.* — Manomètres.
Durand (Eug.). — *France.* — Moteur à essence.
Durenne. — *France.* — Pompe à vapeur et chaudières.
Durozoi (Marcel). — *France.* — Béliers hydrauliques.
Elwel fils. — *France.* — Grue roulante électrique.
Espine (D'), Achard et Cie. — *France.* — Compteurs d'eau.
Fétu, Defize et Cie. — *Belgique.* — Courroies.
Fielding et Platt. — *Grande-Bretagne.* — Pompe à vapeur.
Forest (Fernand). — *France.* — Moteurs à gaz et à pétrole.
Fouché (Frédéric). — *France.* — Chaudière et pompe à vide.
Gandy Belt Manufacturing Co. — *Grande-Bretagne.* — Courroies en coton.
Geneste, Herscher et Cie. — *France.* — Accessoires de canalisations de vapeur.
Girard (Armand). — *France.* — Générateurs de vapeur.
Guichard-Bisson et Cie. — *France.* — Manomètres.
Gustin aîné et fils. — *France.* — Embrayage.
Hamelle (Henry). — *France.* — Graisseurs et épurateurs d'huile.
Henry (René). — *France.* — Robinetterie et graisseur.
Hervé (Henri). — *France.* — Matériel aérostatique.
Huguet (Albert). — *France.* — Machines à vapeur.
Huguet (Albert-H.-T.). — *France.* — Courroies et cuirs emboutis.
Kirkaldy (John), Limited. — *Grande-Bretagne.* — Condenseur par surface.
Knap (Conrad) et Cie. — *Grande-Bretagne.* — Générateur de vapeur système Root.
Lachambre (Henri). — *France.* — Matériel aérostatique.
Lechat (Jules). — *Belgique.* — Courroies en coton.
Lecornu (Al. et P.). — *France.* — Locomobiles.
Lehmann frères. — *France.* — Robinetterie.
Leprince (Alex.). — *France.* — Turbines.
Lerenard (Victor). — *France.* — Pièces de mécanique en caoutchouc.
Letestu (Maurice). — *France.* — Pompes.
Ludwig et Schopfer. — *Suisse.* — Poulies en tôle emboutie.
Magnin (Jérôme) et Cie. — *France.* — Courroies.
Martel et Bousselet. — *France.* — Robinetterie.
Merlin et Cie. — *France.* — Locomobiles.
Morane aîné (Paul-F.). — *France.* — Presses hydrauliques et accumulateur.
Neut (L.) et Cie. — *France.* — Pompes centrifuges.
Nicou et Demarigny. — *France.* — Fumisterie.
Niel (Paul). — *France.* — Moteur à gaz.
Noël (François). — *France.* — Moteur à gaz et à essence.
Oriolle. — *France.* — Générateur de vapeur.
Pécard frères. — *France.* — Locomobiles.
Peltereau (Le jeune frère) [Vve Placide]. — *France.* — Courroies.
Pruvost-Delos. — *France.* — Ponts à bascule.
Raffard (Jules). — *France.* — Balance dynamométrique.
Rebourg (Guillaume). — *France.* — Machine à vapeur.
Roche (Émile). — *France.* — Bascules.
Rousseau (Ph.) et Balland (F.). — *France.* — Pompe à débit variable.
Sallé. — *France.* — Balance calculante.
Salomon frères et Tenting. — *France.* — Moteurs à gaz et à essence.
Samain et Cie. — *France.* — Ascenseurs.
Snyers (Raymond). — *Belgique.* — Frein à brosse.
Société anonyme de distribution de force motrice à domicile. — *France.* — Transmission du travail par le vide.
Société anonyme des moteurs inexplosibles au pétrole et au gaz, système Gaston Ragot. — *Belgique.* — Moteurs à pétrole.
Société Decauville aîné. — *France.* — Grues sur wagons.
Société de construction des ponts et bascules. — *France.* — Bascules vérifiables.
Société de construction des Batignolles. — *France.* — Pulsomètres.
Société de constructions mécaniques à Bâle. — *Suisse.* — Turbines.
Société de l'épuration des eaux industrielles. — *France.* — Épurateur d'eau.
Société des forges et chantiers de la Méditerranée. — *France.* — Machine à vapeur.
Société française de matériel agricole à Vierzon. — *France.* — Locomobiles.
Société générale coopérative pour la construction des chaudières inexplosibles. — *France.* — Générateurs de vapeur.
Taverdon. — *France.* — Moteur rotatif.
Taylor (John) and Sons. — *Grande-Bretagne.* — Moteurs à gaz.
Thomson (John). — *États-Unis.* — Compteurs d'eau.
Tissages et ateliers de construction Diedrichs. — *France.* — Moteur à essence.
Underwood Manufact. Co. — *États-Unis.* — Courroies.
Vabe (Philibert). — *France.* — Injecteurs.
Verlinde (Léon). — *France.* — Appareils de levage.

Vertongen et Harmegnies. — *France.* — Câbles de transmission en chanvre.
Ville-Chatel (De) et Cie. — *Belgique.* — Machines à vapeur.
Villeite (P.). — *France.* — Générateurs de vapeur.
Voruz (J.). — *France.* — Grues à vapeur.
Weber-Landolt (Charles). — *Suisse.* — Moteur à gaz.
Weidknecht (D. Frédéric). — *France.* — Machines à vapeur.
Westinghouse Machine Co. — *États-Unis.* — Machines à vapeur.

MÉDAILLES DE BRONZE.

Académie d'aérostation météorologique. — *France.* — Appareils aéronautiques.
Albasini, Allard et Cie. — *France.* — Produits en amiante.
American Leather Link Belt Co. — *États-Unis.* — Courroies.
Anciens établissements Salarnier. — *France.* — Détails de construction de chaudières.
Anthoni (Gustave). — *France.* — Fondations de machines sur caoutchouc.
Augé (Édouard). — *France.* — Appareils de levage.
Auguet (Armand). — *France.* — Courroies en cuir et en ramie.
Avery (William et Thomas). — *Grande-Bretagne.* — Bascules dites *électriques*.
Backeljau (Théophile). — *Belgique.* — Pulsomètre à gaz.
Beffa (Vve Alexandre). — *France.* — Brosses et écouvillons pour chaudières.
Bertholon (A.). — *France.* — Courroies.
Blackmann Air propeller ventilating Co. — *Grande-Bretagne.* — Ventilateurs.
Boileau (Léon-L.). — *France.* — Mastic isolant.
Bollée (Auguste). — *France.* — Moulin à vent et pompes.
Bourguet (Pierre-Martial). — *France.* — Poulies en fer.
Broquet (Ad.). — *France.* — Pompes.
Burot (A.-L.). — *France.* — Transmission mécanique.
Carette (Paul). — *France.* — Clapet automatique.
Carré (Ferdinand-P.-E.). — *France.* — Organes de machines.
Casalonga (D.-A.). — *France.* — Compteur d'eau.
Casse (Ch.). — *France.* — Manomètres.
Casse (J.) et fils. — *France.* — Transmission mécanique.
Cazaubon (D.) et fils. — *France.* — Pompes et manège.
Chantrenne-Soiron (Georges). — *Belgique.* — Robinetterie et injecteur.
Chartran (Henri). — *France.* — Courroies.
Chérier (Arsène). — *France.* — Transmission mécanique.
Cobbett (W.-Wilson). — *Grande-Bretagne.* — Courroies et accessoires.
Collet (Vve E.). — *France.* — Cordes à boyau.
Colt's Pat fire arms Manuf. Co. — *États-Unis.* — Machine à vapeur mi-fixe.
Coster (De) Rikkers et Cie. — *France.* — Locomobiles.
Crédit agricole (Union des syndicats agricoles de France). — *France.* — Moulin à vent.
Da Costa e Silva. — *Portugal.* — Modèle de machine.
David (Henri). — *France.* — Pompes.
Dawson (James) and Sons. — *Grande-Bretagne.* — Courroies.
Desnos (Édouard). — *France.* — Publication technique.
Deville, Paillette et Cie. — *France.* — Pompes.
Dias (Émilio). — *Portugal.* — Manomètres.
Dodge Manufacturing Co. — *États-Unis.* — Poulies en bois.
Drevdal (F.). — *France.* — Graisseurs.
Dubois (Laurent). — *France.* — Machine à vapeur.
Dumas-Gardeux (Antoine). — *France.* — Brosses à écouvillons pour chaudières.
Dumoulin. — *France.* — Cheminée de chaudière.
Dupuch (Gustave). — *France.* — Robinetterie.
Duval et fils. — *France.* — Garniture métallique.
Duveau (Ad.). — *France.* — Compteur de vitesse.
Émerson et Midgley. — *États-Unis.* — Courroies métalliques.
Fayol (Amédée). — *France.* — Embrayage.
Foccroulle (Charles). — *Belgique.* — Crics.
Giguet (Vve Louis). — *France.* — Détendeur de vapeur.
Girodias (Laurent). — *France.* — Pompes.
Golly (C.-A.). — *France.* — Pièces de mécanisme en fonte.
Gondin (M.) et Théart. — *France.* — Poulies en fer.
Goulds Manuf. Co. — *États-Unis.* — Pompes.

Granjon. — *France.* — Robinetterie.

Henry-Lepaute fils. — *France.* — Moulin à vent.

Herrmann (E.) et Cohen. — *France.* — Foyer de chaudière.

Hirt (Albert). — *France.* — Pompes.

Horne (W.-C). — *Grande-Bretagne.* — Moteur à gaz.

Hunter et English. — *Grande-Bretagne.* — Modèle de grue flottante.

Hureau de Villeneuve (Abel). — *France.* — Publication technique.

Jager (Georges). — *France.* — Cordes à boyau.

Joret frères. — *Belgique.* — Poulies en fer.

Lacroix frères. — *France.* — Turbines.

Lalance. — *France.* — Graisseur.

Lamotte (Théotime). — *France.* — Compteurs de tours.

Laurent frères et Collot. — *France.* — Turbines.

Lefebvre (Victor). — *France.* — Indicateurs dynamométriques.

Legal (Fréd.). — *France.* — Changement de marche.

Lengauchez. — *France.* — Chaudières et grues.

Leroy (C.-N.). — *France.* — Graisseurs.

Licot (Eugène). — *France.* — Appareil de levage.

Lindebriengs-Cuyx. — *Belgique.* — Courroies.

London Water meter C°. — *Grande-Bretagne.* — Compteurs d'eau.

Mabille (Valère). — *Belgique.* — Injecteurs et accessoires de chaudières.

Macfarlane Strang and C°. — *Grande-Bretagne.* — Compteurs d'eau.

Manufacture générale de courroies de transmission (Brichot et Cie). — *Belgique.* — Courroies en crin.

Martiny-Verstraet et Cie. — *France.* — Produits d'amiante et de caoutchouc.

Mason (Volney-W.) and C°. — *États-Unis.* — Embrayage.

Masson (A.-M.). — *France.* — Courroies.

Mathelin et Garnier. — *France.* — Robinetterie et transmission mécanique.

Maxant (Léon-C.). — *France.* — Manomètres.

Ministère de la Marine. — *France.* — Indicateur dynamométrique.

Monseran (Ismaël). — *France.* — Compteurs de petits objets.

Montrichard (Gérard de). — *France.* — Pompe et moteur rotatifs.

Montupet (Antonin). — *France.* — Générateurs de vapeur.

Morelle (Charles) et Cie. — *France.* — Générateurs de vapeur.

Muller (Émile) et Cie. — *France.* — Applications du coton minéral.

Pascaud et Cie. — *France.* — Robinetterie.

Pickering Governor C°. — *États-Unis.* — Régulateur centrifuge.

Pile (Louis). — *France.* — Garniture métallique.

Portafax (Xavier). — *France.* — Compteur pour voitures.

Prudon et Dubost. — *France.* — Pompes.

Quesnot (Émile). — *France.* — Tachymètre.

Radiguet. — *France.* — Modèles de machines.

Reddaway (Franck) and C°. — *Grande-Bretagne.* — Courroies.

Reed (J. van D.). — *États-Unis.* — Courroies en coton.

Réveilhac (J.-Auguste). — *France.* — Pompe à vide.

Roger (E.). — *France.* — Moteur à gaz.

Roullier fils et Mesnard. — *France.* — Courroies.

Rous (E.). — *France.* — Graisseurs.

Schieren (Charles) and C°. — *États-Unis.* — Courroies.

Silver and Deming Manuf. C°. — *États-Unis.* — Pompes et béliers hydrauliques.

Slater Frank. — *États-Unis.* — Commande d'indicateur.

Société anonyme de location et constructions mécaniques. — *France.* — Appareils de levage.

Société anonyme des forges, usines et fonderies de Gilly. — *Belgique.* — Machine à vapeur.

Société anonyme des lièges appliqués à l'industrie. — *France.* — Enveloppes isolantes.

Société anonyme pour l'exploitation d'engins graisseurs à alimentation pneumatique. — *France.* — Paliers graisseurs.

Société anonyme verviétoise pour la construction des machines. — *Belgique.* — Machine à vapeur.

Société des générateurs à vaporisation instantanée. — *France.* — Machines à vapeur.

Société des moteurs à gaz français. — *France.* — Moteurs à gaz.

Société des usines et fonderies de Beaume et Marpent. — *France.* — Transmission mécanique.

Société française des amiantes de Tarascon-sur-Rhône. — *France.* — Produits en amiante.

Stenberg (John). — *Grand-duché de Finlande.* — Robinetterie.

Strube (H.). — *France.* — Robinetterie et accessoires de chaudières.

Suter (Robert). — *Suisse.* — Courroies.

Tayrac (De). — *France.* — Courroies.

Texier de la Pommeraye. — *France.* — Compteurs et distributeurs.

Toisoul (Eug.) et Fradet (Henri). — *France.* — Fumisterie.
Tritscheller (Otto). — *Suisse.* — Pompes.
United Asbestos C°. — *Grande-Bretagne.* — Produits en amiante.
United States Metallic Packing C°. — *États-Unis.* — Garnitures métalliques.
Vantelot-Béranger fils (Albert). — *France.* — Pompes.
Véry (A.). — *France.* — Robinetterie.
Vuaillet (Francis-A.). — *France.* — Dynamomètre de rotation.
Wanner et Cie. — *France.* — Graisseurs.
Wurgler (Carl et August). — *Suisse.* — Courroies.

MENTIONS HONORABLES.

Allaire (Firmin). — *France.* — Moulin à vent.
Alriq (Pierre). — *France.* — Grue roulante.
Anceaux et Kuntzel. — *France.* — Moulin à vent.
Aubry et Cie. — *France.* — Moulin à vent.
Bacle (Désiré). — *France.* — Pédale.
Bastos (Antonio Pinto). — *Portugal.* — Compteurs d'eau.
Batifoulier (C.). — *France.* — Bélier hydraulique.
Beaume (Louis). — *France.* — Moulins à vent et pompes.
Bergès (Aristide). — *France.* — Turbines.
Berhaut (Charles). — *France.* — Compteur d'eau.
Bingham (G.-C.). — *Grande-Bretagne.* — Machine à gaz.
Blétry frères. — *France.* — Dessins de machines.
Block (A.). — *France.* — Courroies tissées.
Blot (J.). — *France.* — Agrafes pour courroies.
Bordone (J.-Philippe). — *France.* — Générateur de vapeur.
Bornet. — *France.* — Moteur rotatif.
Bourdon (L.-C.). — *France.* — Enveloppes isolantes.
Boursier (Jules-P.-A.). — *France.* — Accessoires de canalisation.
Brancher (M.-Antoine). — *France.* — Embrayage et poulies en fer.
Brouillet (Jacques). — *France.* — Joint de sûreté.
Brudenne (J.). — *France.* — Enveloppes isolantes.
Busser (Charles). — *France.* — Dents d'engrenage en bois.
Cambon (Ph.-Auguste). — *France.* — Organes de transmission.
Carpentier (Henri). — *France.* — Pompes centrifuges.
Carré (Edmond). — *France.* — Accessoires de canalisation.
Cassé (L.-E.). — *France.* — Appareils d'aérostation.
Castanon, Menendez et Gil. — *France.* — Pompes.
Cérésa. — *Principauté de Monaco.*
Chameroy (H.). — *France.* — Générateur de vapeur.
Charon (Louis). — *France.* — Moteur à gaz.
Charreton (Ch.). — *Mexique.* — Turbine.
Chevalet (Louis). — *France.* — Épurateur d'eau.
Chevalier (Ch.). — *France.* — Vis à déplacement.
Chicago Rawhide C°. — *États-Unis.* — Courroies.
Compagnie parisienne d'éclairage par l'électricité. — *France.* — Moteur à gaz.
Coret (T.). — *France.* — Soupape de sûreté.
Coux (Jules de la). — *France.* — Graisseurs.
Crèceveur (A.). — *France.* — Grille pour chaudières.
Criner (Georges). — *France.* — Grille pour chaudières.
Dallard (Pierre). — *France.* — Joints pour conduites.
Damiano (François). — *Italie.* — Pompes.
Daugy (François). — *France.* — Changement de marche.
Decourdemanche et Cie. — *France.* — Courroies.
Delafraye (Albert). — *France.* — Courroies et câbles.
Delubac. — *France.* — Accessoires de turbines.
Dernoncourt (Liévin). — *France.* — Régulateur de tirage.
Diénis. — *Nouvelle-Calédonie.* — Modèle de machine.
Donnet (Mme). — *France.* — Enveloppes isolantes.
Ducretet. — *France.* — Épurateur d'huile.
Dusert (Victor). — *France.* — Graisseurs.
Évald (W.). — *Danemark.* — Courroies en coton.
Fabre (Paul) et Tronche. — *France.* — Compteur.
Fabrique de Bioersheim. — *Norvège.*
Faye (Henri). — *France.* — Grille pour chaudières.
Felon (Joseph). — *Belgique.* — Graisseurs.
Foccroulle (Jules). — *Belgique.* — Crics.
Frictionless Engine Packing C°. — *Grande-Bretagne.* — Garniture de presse-étoupe.
Gailard. — *France.*
Gausset (A.) et Cie. — *Belgique.* — Locomobiles.
George (Édouard). — *Belgique.* — Courroies.
Greleau. — *France.* — Compteur d'eau.

IMPRIMERIE NATIONALE.

Groc (Alcide). — *France.* — Joint pour conduite d'eau.
Guillaume (E.-S.). — *France.* — Dessin de pompe.
Guyot (Antoine). — *France.* — Accessoires de chaudière.
Hanrez (Prosper). — *Belgique.* — Générateur de vapeur.
Hindley (E.-S.). — *Grande-Bretagne.* — Machines à vapeur.
Howatson. — *Grande-Bretagne.* — Épurateur d'eau.
Hubert (Philippe) et Cie. — *Autriche-Hongrie.* — Graisseurs.
Jauffret (Vve) et Cie. — *France.* — Enveloppes isolantes.
Journal le *Denis Papin.* — *France.* — Publication technique.
Koenig (Louis). — *France.* — Purgeur automatique.
Kostikoff-Almazoff. — *Russie.* — Modèles.
Kotliarevsky. — *Russie.*
Lacour (Gustave) et Decout-Lacour (Eugène). — *France.* — Pompes centrifuges.
Lacroix (Édouard). — *France.* — Générateur de vapeur.
Lagache (Henri). — *France.* — Graisseurs.
Lagrelle (Alexandre). — *France.* — Agrafes de courroies.
Lambert (Ad.-L.-F.). — *France.* — Fleximètre.
Le Blon (Charles). — *France.* — Pompes.
Leneutre (Omer). — *France.* — Moulin à vent.
Leroux frères. — *France.* — Pompes.
Lessange et Cie. — *Mexique.* — Courroies.
Lion (Mme Mélanie). — *France.* — Enveloppes isolantes.
Lobin fils. — *France.* — Moteur à pression d'eau.
Loison-Prost (Philippe). — *France.* — Agrafes de courroies.
Louap (Eugène). — *France.* — Foyers de chaudières.
Louis (Charles). — *France.* — Crics.
Mabille frères. — *France.* — Grues gerbeuses.
Maiche (L.). — *France.* — Robinet distributeur.
Maignen (P.-A.). — *Grande-Bretagne.* — Épurateurs d'eau.
Michaux et Lefebvre. — *France.* — Graisseurs.
Mignot (Henri). — *France.* — Manomètres.
Millet (F.-T.). — *France.* — Graisseurs.
Moisy (J.-L.). — *France.* — Courroies et produits en cuir.
Moncrieff (John). — *Grande-Bretagne.* — Tubes en verre pour niveaux.
Monicourt (Paul de). — *France.* — Organes de transmission.
Moreau (F.) et Cie. — *France.* — Plaques indicatrices pour machines et chaudières.
Moseley (David) and Sons. — *Grande-Bretagne.* — Courroies en coton.
Moullart (Benjamin). — *France.* — Manomètres.
Nègre et Cie. — *France.* — Pompes.
Nouvelle Société anonyme d'Auderghem. — *Belgique.* — Mastics pour joints.
Pascal et Guadagnino. — *Italie.* — Enveloppes isolantes.
Patent Pump and Blower Syndicate. — *Grande-Bretagne.* — Pompes et ventilateurs.
Pelat. — *France.* — Épurateur d'huile.
Pelizzola (Jean). — *Italie.* — Pompe.
Péret (François). — *France.* — Appareil pour vidanger les chaudières.
Petit de Meurville (Ch.). — *France.* — Graisseurs.
Petit (Jules). — *France.* — Pompes.
Piraut (J.-B.). — *Belgique.* — Locomobiles.
Prouvier (J.). — *France.* — Fumisterie pour chaudières.
Prungnaud (Pierre-Eugène). — *France.* — Courroies.
Radermecker (A.). — *Belgique.* — Courroies.
Revillon et Chaumont. — *France.* — Pompes.
Reynaud et Salles. — *Mexique.* — Courroies.
Rossin (Henri). — *France.* — Moulin à vent et pompes.
Sainte (A.), March et Cie. — *France.* — Compteurs.
Sauzay frères. — *France.* — Pompes.
Schloesing (Henri). — *France.* — Distributeur de liquides.
Société anonyme de l'épurateur Carroll. — *France.* — Épurateur d'eau.
Société des allumoirs-annonces automatiques. — *France.* — Allumoirs-annonces.
Société des turbines atmosphériques. — *France.* — Moulin à vent.
Soyer (B.) et fils. — *France.* — Pompes.
Sporton (Henry) and Co. — *Grande-Bretagne.* — Compteurs d'eau.
Spuhl (H.). — *Suisse.* — Ascenseur.
Syndicat général des chauffeurs et mécaniciens de France. — *France.* — Publication technique.
Thomas-Jésupret. — *France.* — Moteur rotatif.
Toyota (Kanton). — *Japon.* — Produits en amiante.
Trainard (Félix). — *France.* — Générateur de vapeur.
Trinxé (Agustin). — *Espagne.* — Moulin à vent.
Unbreakable Pulley Co. — *Grande-Bretagne.* — Poulies en fer.
Valdo (Jean). — *France.* — Pompes.
Viossat (Victor). — *France.* — Robinetterie.
Wackernie (Alphonse) et Cie. — *France.* — Grille pour chaudières.
Wilson et Roake. — *États-Unis.* — Epurateur d'eau.

COLLABORATEURS.

MÉDAILLES D'OR.

Babey, de la Compagnie de Fives-Lille. — *France.*

Bicking (Fritz), de la Société alsacienne de constructions mécaniques. — *France.*

Buton (Valentin), de la Société centrale de construction. — *France.*

Couffinhal (Gustave), de la maison Biétrix et Cie. — *France.*

Étienne (Louis), de la maison Bourdon (Édouard). — *France.*

Farcot (Paul), de la maison Farcot (Joseph). — *France.*

Laurent (Henri), de la Société centrale de construction. — *France.*

Ponchez (David), de la maison Belleville et Cie. — *France.*

Sevry (Octave), de la maison Piat. — *France.*

Wissler, de la maison Sautter-Lemonnier. — *France.*

Zublin, de la maison Sulzer frères. — *Suisse.*

MÉDAILLES D'ARGENT.

Berthelot (Frédéric), de la maison Belleville et Cie. — *France.*

Bonet, de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du Nord. — *France.*

Bourdon (Émile), de la maison Jean et Peyrusson. — *France.*

Bourdon (Eugène), de la maison Lecouteux et Garnier. — *France.*

Chrétien (Joseph), de la maison Windsor. — *France.*

Coquatrix (Victor), de la maison Domange. — *France.*

Frager (Alph.), de la Compagnie pour la fabrication des compteurs. — *France.*

Freson, de la Compagnie française des moteurs à gaz. — *France.*

Frichart, de la maison Escher, Wyss et Cie. — *Suisse.*

Gerval (Pierre), de la maison E. Bourdon. — *France.*

Gisiger, de la maison Leblanc (Jules). — *France.*

Hertay (Edmond), de la Société anonyme du Phénix. — *Belgique.*

Hoffmann, de l'atelier d'Œrlikon. — *Suisse.*

Joly (Léopold), de la maison Farcot (Joseph). — *France.*

Keller, de la maison Escher, Wyss et Cie. — *Suisse.*

Laurent (Auguste), de la Société alsacienne de constructions mécaniques. — *France.*

Lavo (Alfred), de la maison Brault, Teisset et Gillet — *France.*

Lebeau (Gustave), des anciens établissements Cail. — *France.*

Lebègue, de la maison Boulet et Cie. — *France.*

Lefer (Eugène), de la maison Lecouteux et Garnier. — *France.*

Lemaire (Adolphe), de la Société de construction de la Meuse. — *France.*

Marchal (Jean-Victor), de la maison Thirion. — *France.*

Quillacq fils (Auguste de), de la maison de Quillacq. — *France.*

Ribourt, de la Compagnie de Fives-Lille. — *France.*

Rocher (Ernest), de la maison Halot. — *Belgique.*

Rolland (Henri), de la maison Powell. — *France.*

Ruzicka, de la maison Escher, Wyss et Cie. — *Suisse.*

Schmid (Sulzer), de la maison Rieter et Cie. — *Suisse.*

Schubeler, de la maison Sulzer frères. — *Suisse.*

Weber (Otto), de la maison Rieter et Cie. — *Suisse.*

MÉDAILLES DE BRONZE.

Blancmesnil, de la maison Boulet et Cie. — *France.*

Brandt (Thiébaut), de la maison Steinlen et Cie. — *Alsace-Lorraine.*

Caria (Ernest), de la maison Thirion (A.). — *France.*

Dirico (Émile), de la maison Carels frères. — *Belgique.*

Durieux (Jean), de la maison Crozet et Cie. — *France.*

Fleury (Jean), de la maison Imbert frères. — *France.*

Grandhomme, de la maison Boulet et Cie. — *France.*

Lassaigne, de la Compagnie de Fives-Lille. — *France.*

Lemal (Isidore), de la Société des ateliers de construction de la Meuse. — *Belgique.*

Lemaréchal, de la maison Farcot (Joseph). — *France.*

Maurois (Henri), de la maison Geneste-Herscher et Cie. — *France.*

Navez (L.), de la maison de Ville-Châtel et Cie. — *Belgique.*

Prudhon (Jean), de la maison Roser (N.). — *France.*

Ritz (Gustave), de la Société alsacienne de constructions mécaniques. — *France.*

Robert (Dominique), de la maison Piat (A.). — *France.*

Robine, de la maison Le Blanc (Jules). — *France.*

Roux (Émile), de la maison Thirion (A.). — *France.*

Sabathier (Eug.), de la Société française de matériel agricole. — *France.*

Schreekenberg (Charles), de la maison Steinlen et Cie. — *Alsace-Lorraine.*

Stoepel (Albert), de la Société de construction de Bâle. — *Suisse.*

Temmermar (Henri), de la maison Carels frères. — *Belgique.*

Vallet (Odile), de la maison de Quillacq. — *France.*

Van Ghelder (David), de la maison Carels frères. — *Belgique.*

MENTIONS HONORABLES.

Batut (Pierre-Jean), des anciens établissements Cail. — *France.*

Binet, de la maison Leblanc (Jules). — *France.*

Colot (J.), de la maison Lechat (Jules). — *Belgique.*

Durocher, de la maison Windsor. — *France.*

Fauvel, de la maison Farcot (Joseph). — *France.*

Gouche (Victor), de la maison Bourdon (Édouard). — *France.*

Gougis, de la maison Brault, Teisset et Gillet. — *France.*

Lemaire (Léon), de la maison de Quillacq. — *France.*

Monnot (Nicolas), de la maison Piat (A.). — *France.*

Paris (Émile), de la maison Jean et Peyrusson. — *France.*

Wilhem (Joseph), de la Société alsacienne de constructions mécaniques. — *France.*

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

Composition du jury 3

INTRODUCTION.

Caractère général du présent rapport. — Composition de la classe 52. — Progrès réalisés depuis 1878. — Précision scientifique des machines modernes. — Aspect extérieur. — Influence de la guerre et de la marine. — Des méthodes scientifiques appliquées aux arts mécaniques. — Progrès rapides de quelques industries. — Tables et sommaires 5

CHAPITRE PREMIER.

OPÉRATIONS DES COMITÉS ET DU JURY DES RÉCOMPENSES.

Objet et division.

Comité d'admission.

Comité d'installation. — Constitution, répartition des espaces, dépenses.

Jury des récompenses. — Constitution, mode d'opérer, jurisprudence, récompenses accordées. — Tableau comparatif des exposants récompensés aux Expositions universelles de 1867, 1878, 1889... 11

CHAPITRE II.

ENSEMBLE DE LA CLASSE 52.

Objet du chapitre.

Nombre d'exposants. — Par nature d'objets exposés. — Par nationalité.

Emplacements occupés. — Palais des Machines. — Annexe de la berge. — Exposition de la Grande-Bretagne, des États-Unis, de la Belgique, de la Suisse. — Pavillons spéciaux. — Emplacements affectés au service mécanique.

Service mécanique de l'Exposition. — Ses attributions. — Fourniture de la vapeur. — Canalisation. — Machines motrices. — Transmissions. — Ponts roulants. — Ascenseurs. — Éclairage électrique.

Plan général et légendes.

Données numériques sur le service mécanique de l'Exposition 21

CHAPITRE III.

GÉNÉRATEURS DE VAPEUR.

SECTION I.

GÉNÉRALITÉS.

Objet et division.

Théorie de la production de la vapeur. — Transmission de la chaleur. — Intensité de la vaporisation au coup de feu. — Température de la tôle. — Influence des mouvements de l'eau et des gaz chauds. — Pertes par radiation et conduction. — Réchauffeurs d'eau d'alimentation. — Rôle du réservoir d'eau dans les explosions.

Chaudières à petits éléments. — Leur application dans les stations d'électricité. — Règlements et dérogations.

Pressions en usage. — Détente par cascade.

Vapeur surchauffée.

Accidents de chaudières. — Maladies des chaudières. — Statistique des explosions. — Explosions des chaudières à petits éléments. — Associations de propriétaires d'appareils à vapeur.

Du fer et de l'acier. — Leur emploi dans la construction des chaudières. — Chaudières en acier de Meunier et Cie, de Fontaine et Cie, de Galloway et fils.

Rivures.

Soudure et forgeage. — Chaudières soudées d'Imbert frères, de Davey, Paxman et Cie, de Galloway et fils. Exposition de la Leeds Forge Cie 31

SECTION II.

PRINCIPALES CHAUDIÈRES DE L'EXPOSITION.

Objet et division.

Chaudières à foyer extérieur.

Chaudières à foyer intérieur. — Chaudière Galloway.

Chaudières tubulaires. — Généralités. — Tubes amovibles, systèmes Berendorf, Montupet, Girard. — Chaudière de Davey, Paxman et Cie. — Chaudières semi-tubulaires. — Exposition de Meunier et Cie, de L. Fontaine. — Chaudières à foyer amovible. — Chaudières de Weyher et Richemond, de la Compagnie de Fives-Lille.

Chaudières avec tubes bouilleurs. — Type Field et variétés. — Chaudières d'Imbert frères, de Dulac, de Durenne. — Chaudière de de Dion, Bouton et Trépardoux.

Chaudières à petits éléments. — Généralités; dénominations. — Origines. — Sécurité. — Autres propriétés. — Détails de construction. — Division.

Chaudières à petits éléments avec réservoir. — Chaudières de Babcock et Wilcox, de de Naeyer, de Lagosse et Bouché, de Terme et Deharbe, de Collet, de Roser, d'Oriolle, d'Hanrez.

Chaudières à petits éléments sans réservoir. — Chaudière de Belleville; construction; régulateur de pression; alimentation; séchage de la vapeur; épuration de l'eau.

Moteurs Serpollet 46

SECTION III.

ACCESSOIRES DE CHAUDIÈRES.

Objet et division.

Appareils de sûreté. — Appareils automatiques et appareils indicateurs. — Nomenclature des principaux appareils de sûreté.

Manomètres. — Tube Bourdon. — Exposition de E. Bourdon : manomètres pour hautes pressions; procédés d'étalonnage; manomètres enregistreurs. — Manomètres de Ducomet, de Guichard, de Bisson et Cie, de Devaux et Daclin, de Crosby, de Richard.

Soupapes de sûreté. — Du rôle de la soupape de sûreté. — Soupape incalable de Coret. — Soupapes à grande levée d'Adams, de Dulac, de Wilson. — Joint Brouillet.

Tubes de niveau. — Tubes Moncrieff. — Coupe-tubes de Ducomet. — Indicateur de Vaultier, de Gautreau.

Flotteurs. — Flotteurs de Dupuch, de Carette, de Chaudré. — Indicateur de Dulac. — Autres indicateurs.

Robinetterie pour vapeur. — Exposition de Muller et Roger, de Martel et Bousselet, de E. Bourdon, de Dupuch, de Lehmann, de Colombier. — Robinet-valve de Pile. — Peet-valve. — Robinets-vannes de Véry, de Dupuch.

Clapets de retenue d'alimentation.

Canalisations de vapeur.

Joints de vapeur. — Joint de de Naeyer, de Legat. — Produits d'asbeste d'Albasini, d'Allard, de la Société de Tarascon, de l'United Asbestos Co.

Calorifuges. — Feutre de Mme Lion. — Amiante. — Laine de scorie de Muller. — Liège.

Injecteurs. — Injecteurs de Guyenet, de Vabe, de Thiry et Chantrenne-Soiron, de Cuau.

Réchauffeurs d'alimentation.

Anti-incrustants. — Décanteurs de Wilson et Roake, de Smith, de Dulac. — Épurateurs de Gaillet, de Dervaux, de Desrumeaux, de Howatson.

Régulateur de pression de Belleville.

Régulateurs d'alimentation de Belleville, de Cleuet.

Détendeurs de vapeur de Legat, de Lencauchez, de Francq, de Deniau.

Purgeurs automatiques de Legat, de Cleuet, de Véry.

Clapets automatiques pour vapeur. — Trois types. — Conditions à remplir. — Clapets de Francq et Mesnard, de Pasquier, de Colombier, de Fontaine, de Carette, de Pile, de Labeyrie.

Appareils divers. — Déjecteurs de Lencauchez. — Vidangeur de Péret. — Écouvillons de Dumas-Gardeux, de Beffa 110

SECTION IV.

FOYERS, FOURNEAUX ET CHEMINÉES.

Généralités.

Grilles. — Grilles de Creceveur, de Dulac, de Belleville. — Grille à secousses de Wackernie. — Grille à dalles et grille à barreaux immergés de Perret (Michel). — Foyer de Godillot.

Appareils fumivores. — De la fumivorité. — Souffleur de Belleville. — Foyer Ten-Brinck, perfectionné par Lencauchez. — Grille inclinée de Dulac. — Foyers de Herrmann et Cohen, de Criner.

Fumisterie. — Expositions de diverses maisons.

Cheminées. — Cheminées en briques. — Cheminée en tôle des Ateliers de Creil. 154

CHAPITRE IV.

MACHINES À VAPEUR.

SECTION I.

GÉNÉRALITÉS.

Principaux types de machines. — Installations hors des villes et dans les villes. — Pression; vitesse; détente. — Transmission. — Machine à balancier; machine horizontale; machine-pilon.

Détails de construction. — Cylindre, piston, bâti. — Matériaux de construction : acier, alliages, fonte malléable. — Ajustage. — Graissage. — Condensation. — Aspect général des machines.

Mode de fonctionnement de la vapeur. — Influence des parois. — Expériences de Hirn. — Calcul du travail. — Calcul de la dépense de vapeur. — Vapeur surchauffée. — Enveloppe de vapeur. — Compression. — Détentes par déclenchement et expansion multiple.

De la distribution de la vapeur. — Détente et avances.

Lumières.

Obturateurs. — Obturateurs levants : soupape équilibrée, soupape à double siège ou soupape de Cornouailles. — Obturateurs glissants : tiroir en coquille, tiroirs à jalousie ou à grille, tiroirs compensés, tiroirs pistons, distributeurs coniques, distributeurs à rotation continue. — Tiroirs superposés.

Commande des distributeurs. — Commandes desmodromiques : par un excentrique circulaire, par la manivelle ou la bielle, système Walschaerts, par leviers à rapports variables de vitesse, par rotation continue. — Commandes par déclenchement. — Commandes à repos. — Commandes diverses. — Résumé.

Des moyens de faire varier la puissance motrice. — Par étranglement. — Par la détente : détente variable à la main, par le régulateur, par distributeurs superposés. — Obturation de l'arrivée de vapeur. — Système Farcot. — Système Meyer. — Machines à multiple expansion.

Changement de marche. — Interversion des communications. — Décalage de l'excentrique : décalage à toc, à coulisse. — Coulisse de Stephenson. — Commande par la bielle ou la manivelle. — Machines à multiple expansion.

Distributions spéciales. — Mise en train des locomotives compound. — Machines à simple effet. — Pompes sans arbre tournant. — Servo-moteur. — Machines rotatives. — Turbo-moteur. — Pulsomètre. — Injecteur.

Divisions du chapitre. 167

SECTION II.

MACHINES FIXES.

Objet et division.

Machines monocylindriques à vitesse modérée.

Petites machines fixes.

Distribution système Farcot et dérivés. — Machine de Buffaud et Robatel. — Distribution de Pantin. — Machine du Phœnix.

Détente par obturation de l'arrivée de vapeur. — Machine de Gilly.

Machines à balancier. — Machine de Casse.

Distribution système Meyer et dérivés. — Machines de Davey, Paxman et Cie, de Boulet. — Distribution Rider. — Machines d'Escher, Wyss et Cie, de Merlin. — Distribution de Finck, de Damey, de Bonjour.

Distribution de Joy.

Machines monocylindriques à grande vitesse. — Machines d'Escher, Wyss et Cie, d'Armington et Sims, de la Straight Line, de Sautter et Lemonnier, d'OErlikon, de Lecouteux et Garnier.

Machines monocylindriques à distribution par déclenchement.

Machines à quatre distributeurs cylindriques. — Machines de Lecouteux et Garnier, de Brasseur, de Farcot, du Creusot, de Darblay. — Distribution Frikart.

Machines à quatre distributeurs plats. — Machines de Halot, de Brown, de Fives-Lille, de la Société Verviétoise, de Hoyois, de Jean et Peyrusson.

Machines à deux lumières. — Machine de Wheelock; type de 1878, type de 1885; machines de de Quillacq, de Brasseur. — Distribution Stoppani; machine de Dyckhoff. — Distributions par soupapes, type Sulzer : machine de Sulzer, de Carels. Machines de la Société de la Meuse, de Couillet, de Windsor.

Machines à distributions diverses. — Machines de Bonjour (l'Horme et Borssat). — Changements de marche de Roirant, de Daugy. — Machines à distributeurs rotatifs de Biétrix, de Brotherhood.

Machines à expansion multiple. — Historique : travaux de B. Normand. — Principes de ces machines. Dispositions principales et classification. — Machines Woolf de Windsor, de Douane, Jobin et Cie.

Machines compound. — Dispositions diverses.

Machines compound horizontales avec distribution ordinaire du Phœnix, d'Olry, Granddemange et Coulanghon, de Chaligny, de la Société suisse, de la Société alsacienne, de Boulet, de l'Horme (système Bonjour), de Biétrix.

Machines compound horizontales avec distribution par déclenchement de Berger-André. — Machines à distribution Frikart de la Société alsacienne, d'Escher Wyss. — Machines de Brasseur, systèmes Corliss et Wheelock. — Machines Wheelock de de Quillacq. — Machines à distribution par soupapes de Sulzer, de Carels.

Machines compound pilon de Weyher et Richemond, de Farcot, de Cail, de Fives-Lille, de Buffaud et Robatel, de Boulet, de Sulzer, d'OErlikon (système Hoffmann), des Forges et Chantiers de la Méditerranée, de Bréguet, de Chaligny, de Sautter et Lemonnier, de Biétrix.

Machines compound en tandem de Windsor, de de Ville-Châtel (système Frikart), de Biétrix.

Machines à triple expansion de Weyher et Richemond, de Farcot, de Sulzer (pilon et tandem, système Züblin), de Powell, de Rebourg.

Appareils divers. — Condenseurs. — Condenseurs de Weyher et Richemond, de Kirkaldy, de Fouché. — Refroidisseurs d'eau condensée de Chaligny, de Grangé..... 207

SECTION III.

MACHINES LOCOMOBILES, MI-FIXES ET DIVERSES.

Objet et division.

Locomobiles et machines mi-fixes. — Dispositions générales des locomobiles. — Dispositions générales des machines mi-fixes. — Locomobiles et mi-fixes de Weyher et Richemond, de Chaligny, de Boulet, de Biétrix, de Dandoy-Mailliard, de Bérendorf, d'Albaret, de la Société de Vierzon, de Damey, d'Olry et Granddemange, de Weidknecht, de la Société alsacienne, de Pécard, de Davey-Paxman, d'OErlikon, de la Société suisse.

Moteurs à vapeur domestiques de Baxter, de Friedrich, de Hatorn-Davey, de Serpollet.

Machines à vapeur à simple effet de Brotherhood, de Burgin, de Brown, de Westinghouse.

Machines de Bonjour, de Montrichard.

Machines rotatives de Taverdon, de Bornet, de West, de Nègre, de Jésupret.

Turbo-moteur de Parsons.

Servo-moteur de Farcot..... 315

SECTION IV.

RÉGULATEURS ET MODÉRATEURS DE MOUVEMENT.

Généralités. — Division. — Disposition des régulateurs. — Détente variable. — Valve-papillon. — Régularisation des machines compound. — Transmission. — Frein liquide. — Transmission à double embrayage. — Transmission par servo-moteur. — Commande du régulateur. — Le volant.

Descriptions. — Régulateur de Farcot. — Compensateur de Denis. — Régulateurs de Biétrix, de Buss, de Pickering, de Taverdon. — Régulateurs dans le volant de Lecouteux et Garnier, d'Escher Wyss, de la machine Straight Line, d'Armington et Sims, d'OErlikon, de Westinghouse.... 348

CHAPITRE V.

MACHINES THERMIQUES AUTRES QUE CELLES À VAPEUR D'EAU.

Généralités. — État actuel de la question. — Rendement de la chaleur. — Comparaison avec la machine à vapeur. — Conditions industrielles.

Résumé historique. — Vapeur d'eau surchauffée. — Vapeurs diverses.

Machines à air chaud. — Des régénérateurs. —

Chauffage intérieur ou extérieur. — Combustibles employés : solides, gazeux ou liquides.

Machines à explosion. — Des pertes de chaleur. — Allumage. — Refroidissement. — Organes régulateurs. — Cycle à quatre temps. — Questions diverses. — De l'emploi des machines à gaz. — Résumé.

Partie descriptive. — Division.

Machines à combustible solide. — Considérations générales. — Machines à air chaud de Brown, de Bénier.

Machines à gaz à explosion sans compression. — Moteurs de Forest, de Bénier, de Bisschop.

Machines à gaz à explosion avec compression. — Généralités. — De la compression. — Beau de Rochas et Otto. — Variantes du cycle à quatre temps.

Machines avec cycle à quatre temps. — Machines Otto de la Compagnie française des moteurs à gaz, de Crossley. — Machines de Lenoir (Rouart), de Kœrting-Lieckfeld (Boulet), de Delamare, Debouteville et Malandin (Powell), de Pers et Forest (Delahaye). — Distributeur Niel. — Machine de Charon.

Machines avec cycle à deux temps de Ravel, de Benz (Roger), de Baldwin (Otis), de Taylor, de Griffin.

Machines à combustibles divers.

Gazogènes. — Installation de Powell. — Gazogène Dowson (Dehaître).

Combustibles liquides. — Carburateurs de Lenoir (Rouart), de Salomon et Tenting, de Durand. — Machines des Ateliers Diederichs, de Ragot.

Appareils divers. — Pompe automatique de Backeljau. — Canot à vapeur de naphte de Yarrow.

Résumé..... 363

CHAPITRE VI.

MACHINES HYDRAULIQUES.

SECTION I.

MACHINES HYDRAULIQUES ÉLÉVATOIRES.

Généralités. — Division du chapitre et de la section.

Pompes à piston. — Dispositions.

Pompes à bras de Letestu, de Douglas, de Thirion.

Pompes à vapeur. — Pompes avec et sans volant. — Vitesses pratiquées. — Petites pompes à vapeur de Buffaud et Robatel, de Le Blanc, de Thirion, de Belleville, de Worthington. — Grandes pompes à vapeur de de Quillacq et Meunier, de Worthington.

Pompes à moteurs hydrauliques de Meunier (Feray), d'Escher Wyss, de Roux (Crozet).

Pompes diverses. — Pompe à débit variable de Rousseau et Balland. — Pompe Baillet et Audemar. — Pompe monoclapet de Henry et du Marais (Prudon et Dubost).

Pompes oscillantes et rotatives. — Pompe oscillante de Sauzay. — Pompes rotatives de Douglas, de Skinner (*Patent pump and blower Syndicate*), de Montrichard.

Pompes à chapelet.

Pompes centrifuges. — Appold, Gwynne, Neut et Dumont. — Pompes de Dumont, de Fives-Lille, de Decœur. — Usine de Khatatbeh, par Farcot.

Béliers hydrauliques de Bollée, de Durozoi, de Decœur, de Douglas.

Pulsomètre de Hall (Société des Batignolles). 423

SECTION II.

RÉCEPTEURS HYDRAULIQUES.

Généralités. — Caractères généraux des moteurs exposés. — Division.

Machines à colonne d'eau de Brotherhood, de Mégy, de Samain.

Roues hydrauliques. — Usine de Pont-Vincent, par Brault, Teisset et Gillet.

Turbines. — Questions générales. — Turbines à chute modérée de Feray, de Brault, Teisset et Gillet, de Royer, de Leprince. — Distribution d'eau de Genève, turbines d'Escher Wyss. — Turbines à haute chute, d'Escher Wyss, de la Société alsacienne, de Rieter, de la Société Électricité et Hydraulique..... 466

SECTION III.

PRESSES ET ACCUMULATEURS.

Généralités. — Pascal, Bramah, Armstrong. — L'accumulateur. — Pressions en usage. — Principales applications. — Caractères de cette exposition.

Appareils exposés par l'Hydraulic Engineering Company, par Morane jeune, par Morane aîné. 488

SECTION IV.

APPAREILS DIVERS.

Compteurs d'eau. — Généralités.

Compteurs sans pression de Casalonga, de Bonijoly et de Prandières (Compagnie des Forges de l'Horme).

Compteurs sous pression. — Conditions à remplir. — Compteurs à turbine de Berhaut. — Compteurs à piston de Schmid (d'Espine, Achard), de Samain, de Frager (Bariquand, Michel), de Thomson, de la *Watermeter C°*.

Régulateur de Bourdilliat (Leprince).

Vanne cylindrique de Decœur.

Pnéole de de Romilly.

Appareils de Parenty..... 494

CHAPITRE VII.

COMPRESSION ET MOUVEMENT DES GAZ.

Généralités. — Division.

De l'air comprimé. — Transmission par l'air sous pression. — Effets des variations de température. — Moyens de les atténuer. — Pressions en usage. — Canalisations. — Récepteurs. — Transmission par le vide.

Partie descriptive. — Distribution Popp. — Compresseurs de Burckhardt, de Thirion, de Mékarski, de Sautter et Lemonnier, de Brotherhood. — Distribution par le vide de Boudenoot.

Ventilateurs. — Ventilateurs volumogènes de Skinner, de Mortier (Biétrix). — Ventilateurs à inertie de Geneste et Herscher, de Blackmann, de la Société Électricité et Hydraulique. — Ventilation par entraînement de Vabe.

Moulins à vent. — Panémones..... 507

CHAPITRE VIII.

TRANSMISSION DU TRAVAIL.

SECTION I.

COURROIES ET SYSTÈMES FUNICULAIRES.

Généralités. — Transmissions par courroies. — Transmissions courantes. — Vitesses en usage. — Glissements. — Transmissions principales.

Construction des courroies. — Courroies en cuir de Domange et autres fabricants. — Courroies articulées d'Angus, de Roullier et Mesnard, de l'*American Company*. — Courroies en tissu de Lechat et autres. — Cordes à boyau. — *Transmissions par câbles* de Vertongen et Harmignies.

Poulies en fer de Brancher, de Ludwig et Shopfer. — Poulies en bois de Dodge..... 527

SECTION II.

ENGRENAGES, EMBRAYAGES, DÉCLICS.

Division.

Engrenages. — Considérations générales. — Engrenages de Piat.

Accouplement de Raffard.

Embrayages. — Embrayages de Mégy, Écheverria et Bazan, de Mason, de Deliège, de Brancher, de Gustin, de Farcot, de Snyers.

Observations sur les embrayages..... 535

SECTION III.

TRANSMISSIONS DIVERSES.

Arbre flexible.

Transmissions à grande distance. — Généralités.

Transmissions mécaniques. — Câble télodynamique. — Tramways funiculaires.

Transport par réservoirs.

Transport par canalisation. — Division. — Air comprimé. — Eau sous pression : l'*Hydraulic Engineering C°*. — Eau chaude : distribution de Boston.

— Vapeur : distribution de New-York. — Courants électriques; historique sommaire; propriétés et emplois.

Des combustibles comme véhicules de travail.
Résumé..... 545

SECTION IV.

APPAREILS DE GRAISSAGE, JOINTS.

Objet et division.

Joints de résistance mobiles. — Par roulement. — Par glissement. — Matière des coussinets, bronzes, métaux blancs, bois. — Matières lubrifiantes, organiques, minérales; modes d'emploi. — Coussinets à billes de Cambon.

Graissage à l'air libre. — Mèches, trous gradués, système Verny, tige vibrante, compte-gouttes, système de la Coux. — Canalisations d'huile. — Graisseurs continus de Piat. — Emploi de la graisse consistante, système Stauffer, Leneveu, etc.

Graissage sous pression. — Graisseur ordinaire. — Variétés, système Pearsons, de la Coux, Mense. — Graissage de la vapeur, systèmes Hamelle, Bourdon, Crosby. — Graisseur Schober. — Graissage par refoulement.

Avertisseur Raffard.

Joints d'étanchéité fixes. — A cru, par matage, divers.

Joints d'étanchéité glissants. — A cru, par cuir, pâteux. — *Presse-étoupe :* garnitures Wanner, Duval, Pile, de la *Metallic Packing C°*..... 557

CHAPITRE IX.

MACHINES SERVANT À LA MANOEUVRE DES FARDEAUX.

Objet et division.

Appareils de levage à bras. — Généralités. — Crics et vérins. — Vérins hydrauliques. — Appareils funiculaires : liens à section uniforme, treuils, cabestans, poulies, palans. — Liens à engrenage de Vaucanson, de Galle, de Neustadt, chaîne calibrée. — Palan différentiel. — Exposition de Foccroulle (Jules), de Foccroulle (Charles), de veuve Bernier, de Decauville, de Verlinde, de Mabille; chaînes d'Augé.

Appareils de levage mus par la puissance mécanique. — Appareils avec machine et chaudière. — Appareils mus par transmission. — Expositions de Voruz, de Caillard, de Sautter et Lemonnier, de Bon et Lustremant, de Fives-Lille, de Guyenet, de Hunter et English, de l'*Hydraulic Engineering C°*.

Ascenseurs et monte-charges. — Généralités. — Système Edoux; système à chaîne mouflée; systèmes divers. — Ascenseurs de l'Exposition. — Ascenseurs de Samain, de l'*Hydraulic Engineering C°*. — Ascenseurs de la tour Eiffel. — Ascenseurs de la tour Eiffel, de Roux, Combaluzier et Lepape, d'Otis, d'Edoux.

Ponts roulants de Bon et Lustremant, de Mégy, Écheverria et Bazan.

Grue de Guyenet pour le montage de la tour Eiffel..... 575

CHAPITRE X.

MESURE DU TRAVAIL ET DE LA FORCE.

SECTION I.

APPAREILS DE PESAGE.

Généralités.

Expositions de Trayvou, de Pruvost-Delos, de Sallé, de Roche. — Bascule vérifiable de Guillaumin (Société de construction des ponts et bascules). — Bascule numéroteuse de Chameroy. — Bascule électrique de Snelgrove (Avery)..... 613

SECTION II.

DYNAMOMÈTRES, COMPTEURS, ENREGISTREURS.

Généralités. — Division.

Mesure de la force. — Dynamomètres statiques. — Machines à essayer les matériaux. — Machines de Trayvou, de Delaloë, d'Amsler.

Mesure de la vitesse. — Compteurs chronométriques. — Compteurs de tours. — Enregistreurs. — Tachymètres. — Compteurs de Deschiens, de Château, de Monseran, de Sainte, de Texier de la

C. F

Pommeraye, de Bisson, de Lamotte, de Portafax. — Tachymètres de Buss, de Richard, de Duveau.

Mesure du travail. — Frein de Prony. — Dynamomètres. — Frein Raffard. — Dynamomètres de rotation de Creil, de Vuaillet, de Leneveu, d'Eug. Bourdon, de Richard, de Raffard, de Panhard et Levassor. — Indicateur de Watt. — Le cheval-vapeur. — Congrès de Paris. — Le poncelet. — Indicateurs de Crosby, de Garnier, de Martin, de Lefebvre. 618

CHAPITRE XI.

PIÈCES DE MÉCANIQUES DÉTACHÉES.

Généralités.

Pièces forgées et rivées. — Exposition de la *Leeds Forge*, de Galloway, de Meunier, de Salarnier. — Pièces soudées de Galloway, de Davey-Paxman, d'Imbert.

Pièces fondues. — Expositions de Burlin, de Barraud, de Lehmann, de Taverdon. — Garniture de piston de Carré. — Chaîne de Benoît. — Pièces en caoutchouc de Lerenard, d'Angus. 641

CHAPITRE XII.

OBJETS DIVERS.

Mécanismes et procédés divers. — Pédale magique, par Bâcle. — Mouton à vapeur de Lacour. — Isolation des machines, par Anthoni. — Modèles de Radiguet.

Aérostation. — Historique sommaire. — Travaux de Renard et Krebs, des frères Tissandier. — Exposition de Yon, de Lachambre, de Hervé, de l'Académie d'aérostation météorologique.

Publications industrielles d'Armengaud; le Génie civil; la Revue industrielle, la Chronique industrielle; ouvrages de Buchetti, de Desnos; l'Aéronaute.

Associations. — Association pour prévenir les accidents de machines de Rouen, des Industriels de France. — Associations de propriétaires d'appareils à vapeur. — Chauffeurs et mécaniciens de France, de la Seine.

Congrès de mécanique.

Conférence sur la mécanique.

Exposition du Comité d'installation de la classe 52. 645

CHAPITRE XIII.

QUESTIONS GÉNÉRALES ET RÉSUMÉ.

Division.

Progrès réalisés depuis l'Exposition de 1878. — Générateurs de vapeur, accessoires et foyers. — Machines à vapeur; dispositions américaines; régulateurs; machines spéciales. — Machines à gaz. — Machines hydrauliques élévatoires et motrices. — Gaz sous pression. — Transmissions. — Appareils de levage. — Expositions diverses.

Contribution de divers pays dans les progrès de la mécanique. — États-Unis, Suisse, Belgique.

La mécanique en France. — Documents statistiques. — Imitation des machines étrangères. — Esprit d'invention. — Situation des industries mécaniques. — Charges qu'elles ont à supporter. — Défaut de stabilité. — Suspension des grands travaux. — De l'enseignement technique; laboratoire de mécanique.

Résumé. 663

Liste des récompenses décernées par le jury de la classe 52, avec indication des objets récompensés. . 683